



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

PARAMETRICKÁ STUDIE ZAŘÍZENÍ PRO ZPĚTNÉ ZÍSKÁVÁNÍ TEPLA

PARAMETRIC STUDY OF AIR HEAT EXCHANGER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. DAVID PODOLA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAN FIŠER, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. David Podola

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Technika prostředí (2301T024)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Parametrická studie zařízení pro zpětné získávání tepla

v anglickém jazyce:

Parametric Study of Air Heat Exchanger

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Energetická spotřeba budov ve vyspělých zemích představuje cca 40% celkové spotřeby energie. Vzhledem k tomuto významnému podílu je tedy nezbytné zabývat se snižování této náročnosti a to jak z hlediska ekonomického tak především z hlediska ekologického. Jednou z oblastí s vysokým potenciálem úspor se zpětné získávání tepla při řízeném větrání, pro které lze využít regenerační přepínací jednotky. Efektivita regenerace tepla je však u těchto zařízení závislá na konstrukci regeneračního výměníku a vhodném řízení větracích jednotek.

Cíle diplomové práce:

Cílem DP je parametrická studie provozních parametrů přepínací decentrální regenerační jednotky s bližším zaměřením na studii parametrů keramického výměníku. Studie bude zaměřena především na geometrii voštinového výměníku, přičemž studie systému řízení se bude zabývat především vlivem délky periody reverzace ventilátoru a vlivy parametrů větracího vzduchu (teplota, vlhkost, průtok) na účinnost zpětného získávání tepla. Studie bude provedena pomocí CFD simulace pro podmínky provozu jednotky v zimním období, přičemž výsledky ze simulací výměníku budou porovnány s výsledky měření reálné jednotky pro zpětné získávání tepla.

Seznam odborné literatury:

- [1] www.tzb-info.cz
- [2] Adapco STAR-CCM+ User manual
- [3] TYWONIAK J.: Nízkoenergetické domy, Grada 2005
- [4] www.atrea.cz

Vedoucí diplomové práce: Bc.Ing. Jan Fišer

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 16.11.2011

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá studiem vlivu změn provozních a geometrických parametrů regeneračního výměníku na účinnost decentrální větrací jednotky se zpětným získáváním tepla.

Decentrální větrací jednotku lze využít při větrání zejména rodinných domů a menších administrativních budov.

Výstupem práce je zjištění účinnosti konkrétního vyráběného modelu decentrální větrací jednotky a přehled o možnostech zvýšení účinnosti zpětného získávání tepla zkoumané jednotky.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the impact of changes in operating and geometrical parameters of regenerative heat exchanger on the efficiency of decentralized ventilation units with heat recovery.

Decentralized ventilation unit can be used for ventilation of family houses or smaller administration buildings.

Output of this work is to determine the efficiency of a particular produced model of decentralized ventilation unit and overview of the possibilities increased efficiency of heat recovery of this units.

KLÍČOVÁ SLOVA

decentrální větrací jednotka, parametrická studie, výměník tepla, účinnost, zpětné získávání tepla, měření, CFD simulace

KEY WORDS

decentralized ventilation unit, parametric study, heat exchanger, efficiency, heat recovery, measurement, CFD simulation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PODOLA, D. *Parametrická studie zařízení pro zpětné získávání tepla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 133 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Fišer, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Parametrická studie zařízení pro zpětné získávání tepla* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

31. května 2012

.....

David Podola

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych velmi poděkovat všem lidem, kteří se podíleli na tvorbě diplomové práce.

Zejména bych chtěl poděkovat mému vedoucímu práce, **Ing. Janu Fišerovi, Ph.D.** za jeho velmi vstřícný a ochotný přístup, za vyřízení zapůjčení měřicích přístrojů, pomoc při vytváření CFD simulace a cenné rady při řešení mnoha problémů, které se při tvorbě práce vyskytly.

Další velké poděkování patří **Ing. Lud'kovi Rafajovi**, který pro práci poskytl hlavní objekt zkoumání – větrací jednotku.

Chtěl bych také poděkovat lidem za rady a pomoc při zpracovávání následujících oblastí práce:

Jiří Hejčík – konzultace při zjišťování tepelné kapacity výměníku, pochopení dějů při přestupu tepla ve výměníku

Ing. Matěj Forman, Ph.D. – konzultace a správa hardwaru při CFD modelování, rady při CFD modelování

Bc. Ján Tuhovčák – konzultace a rady při CFD modelování

Ing. Marie Ptáčková – konzultace ohledně materiálu výměníku

Ing. Drahomíra Janová – chemický rozbor materiálu výměníku

prof. RNDr. Jaroslav CIHLÁŘ, CSc. – konzultace ohledně materiálu výměníku

prof. RNDr. Karel MACA, Dr. – konzultace ohledně materiálu výměníku

Poděkování patří také lidem, kteří do práce poskytli hardwarové vybavení:

Radek Kegler – výroba dřevotřískové výplně okna, pomoc při měření jednotky

Jan Podešva – výroba druhého venkovního krytu jednotky

Antonín Válek – zhotovení otvoru do středu výměníku

Za pomoc při tvorbě ovládacího softwaru pro měření jednotky a za pomoc při instalaci měřicí sestavy bych chtěl poděkovat mému bratrovi, *Adamovi Podolovi*.

Při samotném měření jednotky mně poskytli svou pomoc tito lidé, kterým bych chtěl rovněž poděkovat:

Iveta Podolová

Aneta Rafajová

Jaromír Podola

Denisa Rafajová

OBSAH

Úvod	14
Vymezení cílů práce	16
Postup při řešení diplomové práce	17
1 Popis studovaného zařízení pro ZZT	18
2 Měření fyzického modelu výměníku	20
2.1 Návrh provedení experimentu	20
2.2 Použité přístroje a jejich rozmístění	22
2.3 Obecná metodika zaznamenávání dat při měření	25
2.4 Naměřená data a jejich vyhodnocení	26
2.4.1 Rychlosti proudění – průtoky vzduchu	26
2.4.2 Křivky cyklického nabíjení a vybíjení	49
2.4.3 Křivky úplného nabíjení a úplného vybíjení – validační křivky	72
2.4 Shrnutí výsledků	86
3 Validace CFD modelu systému výměník + vzduch	89
3.1 Omezení rozsahu simulačních schémat	89
3.2 Tvorba CFD modelu systému	89
3.2.1 Počáteční a okrajové podmínky	89
3.2.2 Tvorba 3D CAD modelu systému	91
3.2.3 Zjednodušení 3D CAD modelu systému pro simulaci	92
3.2.4 Převod 3D CAD modelu na CFD model	93
3.2.5 Tvorba kompletního CFD modelu	94
3.3 Ladění CFD modelu	98
3.3.1 Kritérium pro validovaný výpočtový model	98
3.3.2 Průběh ladění	98
3.4 Validovaný CFD model systému výměník + okolní vzduch	101
4 Parametrická studie vlivu geometrického tvaru kanálů na účinnost systému	102
4.1 Omezení rozsahu studie	102
4.2 Parametry ovlivňující účinnost ZZT	102
4.3 Tvary jednotlivých modifikací průtočného průřezu výměníku	103
4.4 Metodika provedení studie vybraných tvarů kanálů	103
4.5 Vyhodnocení výsledků studie	105
4.5 Odhad vlivu poměru plochy materiálu výměníku a plochy kanálů výměníku v příčném průřezu přes výměník na účinnost	106
Závěr	108
Seznam obrázků	109
Seznam tabulek	112
Seznam poznámek	113
Seznam použitých zkratk a symbolů	114
Seznam použitých zdrojů	118
Seznam příloh	119
Přílohy	120

ÚVOD

Problematika větrání budov

Při stále rostoucích finančních nákladech na energie pro vytápění budov vyvstala otázka, jak tyto náklady snížit.

Nejčastěji užívaným řešením v současnosti je zateplení obálky budovy a instalace oken s dobrými tepelně-izolačními vlastnostmi. Náklady na vytápění se tak sníží, zároveň vyvstává minimálně stejně důležitá otázka problematiky větrání budovy.

Krátká exkurze do vývoje problematiky větrání budov: V minulosti, kdy náklady na energie byly na nižší úrovni než v současnosti a zároveň technologie umožňující zatěsnění obálky budovy neumožňovaly tak kvalitní zatěsnění jako dnes, docházelo k dostatečné výměně vzduchu uvnitř budovy přirozenou cestou infiltrace, nejvíce přes okna a dveře.

Dnešní stav, kdy obálka nových budov a obálka starších zateplených budov neumožňuje zejména vlivem instalace těsných oken téměř žádnou výměnu vzduchu uvnitř budovy, dochází ke zvyšování koncentrace škodlivin ve vnitřních prostorech. Škodlivinami jsou zejména oxid uhličitý, vodní pára, prach, aromatické uhlovodíky a pachy. Uvedené prostředí poskytuje lepší podmínky pro rozmnožování a šíření bakterií a virů způsobujících nejružnější nemoci.

Důsledkem vysoké kontaminace vzduchu uvnitř budov škodlivinami je vyšší nemocnost obyvatelstva, což vede v konečném důsledku ke zvýšení nákladů ve zdravotnictví. Vysoká koncentrace oxidu uhličitého ve vzduchu způsobuje zpomalení myšlenkových pochodů člověka. Konečným důsledkem je nižší celková ekonomická produkce obyvatelstva a z toho plynoucí nižší životní úroveň.

Snížení koncentrace škodlivin uvnitř budov je možno dosáhnout několika způsoby, viz další text.

Způsoby řešení větrání budov

Základními požadavky na systém větrání jsou:

1. *Snížení koncentrace škodlivin ve vzduchu uvnitř budovy*
2. *Zpětné získávání tepla ze vzduchu odváděného z místnosti*

Poznámka k bodu č. 2: Jestliže je budova zateplena a vybavena těsnými okny, je vhodné zařadit do větracího systému i zpětné získávání tepla. Pokud by zpětné získávání tepla zařazeno nebylo, těsnost oken by zcela postrádala smysl, neboť netěsná okna by systém bez zpětného získávání tepla mohla nahradit částečně nebo v celém požadovaném rozsahu.

Systémy větrání se zpětným získáváním tepla se dělí na dvě základní skupiny: centrální a decentrální.

- *centrální systém* sestává z centrální jednotky umístěné nejčastěji ve strojovně budovy a z rozvodů vzduchu
 - *výhody*: lze použít i jako vytápění
 - *nevýhody*: i při kvalitní filtraci dochází k usazování nečistot v systému vzduchovodů a tím i horším parametrům vzduchu přiváděného do místnosti, vyšší provozní náklady než u systémů decentrálních
- *decentrální řízené systémy výměny vzduchu*
 - *řízené* – výměna vzduchu je řízena dle předem stanoveného postupu

- *výhody*: snadno čistitelné, nevyžadují rozvody vzduchu, vyžadují pouze rozvody elektřiny na jejich pohon, nízké provozní náklady
- *nevýhody*: neumožňují regulovat vlhkost vzduchu v místnosti (redukce vlhkosti závisí na parametrech vzduchu uvnitř a vně větraného prostoru, ze zkušeností z provozu jednotek však požadavkům vyhovuje)

Mezi decentrální větrací systémy patří ještě *neřízené decentrální systémy výměny vzduchu* (odsávání vzduchu z koupelen, digestoře atd.), které však neumožňují zpětné získávání tepla.

Možnosti použití uvedených větracích systémů se liší pro jednotlivé typy staveb a rozhodujícím kritériem je ve většině případů **potřebné místo**, které bude zastavěno instalací větracího systému:

Novostavby umožňují instalaci jak centrálních tak decentrálních jednotek. Potřebné místo pro zastavěnou plochu lze zahrnout do projektu a rozměry budovy vyžadovanému místu přizpůsobit.

Rekonstrukce neumožňují měnit rozměry budovy (nebo ve velmi omezené míře) a dodatečná instalace centrálního systému se tak stává velmi problematickou, v mnoha případech zcela nemožnou. U rekonstrukcí se mírně liší situace pro následující typy budov:

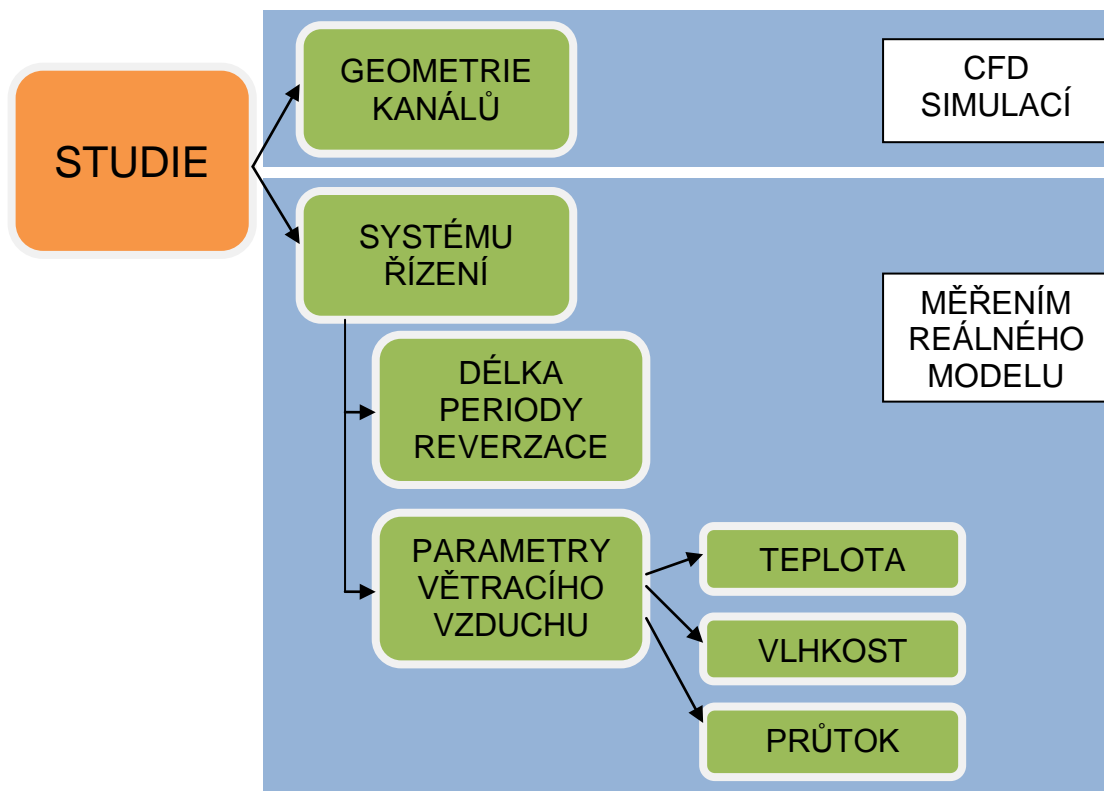
- *rodinné domy*: místo pro instalaci centrálního systému je velmi omezené, decentrální systém je možno ve většině případů instalovat velmi snadno
- *byty v bytových domech*: domovní rozvody jsou prostorově velmi omezené, situace pro instalaci centrálního systému je ještě nepříznivější než u rodinných domů, decentrální systém lze opět instalovat bez větších obtíží
- *veřejné budovy*: umožňují dodatečnou instalaci centrálního i decentrálního systému, záleží na požadavcích konkrétního projektu

Lze předpokládat, že problematika větrání budov bude stále více aktuální. Na základě tohoto předpokladu vznikla diplomová práce. Jako objekt zkoumání byla vybrána decentrální větrací jednotka se zpětným získáváním tepla a vlhkosti. Jednotka byla vybrána pro její předpokládané budoucí široké uplatnění při řešení problematiky větrání budov.

VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

Práce se bude zabývat studií provozních a geometrických parametrů decentrální větrací jednotky s regeneračním výměníkem.

Studie bude zaměřena na zjištění vlivu následujících parametrů jednotky na účinnost zpětného získávání tepla (ZZT) z odpadního vzduchu:



Obr. 0.1: Vývojový diagram postupu prací na DP

Systém řízení

Vliv délky periody reverzace a vliv parametrů větracího vzduchu byl stanoven na základě **empirických měření na reálném modelu**, neboť empirická měření poskytují rychlejší dosažení výsledků nežli CFD simulace (měření probíhá na existujícím fyzickém modelu výměníku, není třeba vyrábět žádný jiný). CFD simulace tedy nebyla provedena z důvodu její vysoké časové náročnosti, data z měření plně postačují ke zjištění vlivu výše uvedených parametrů na účinnost.

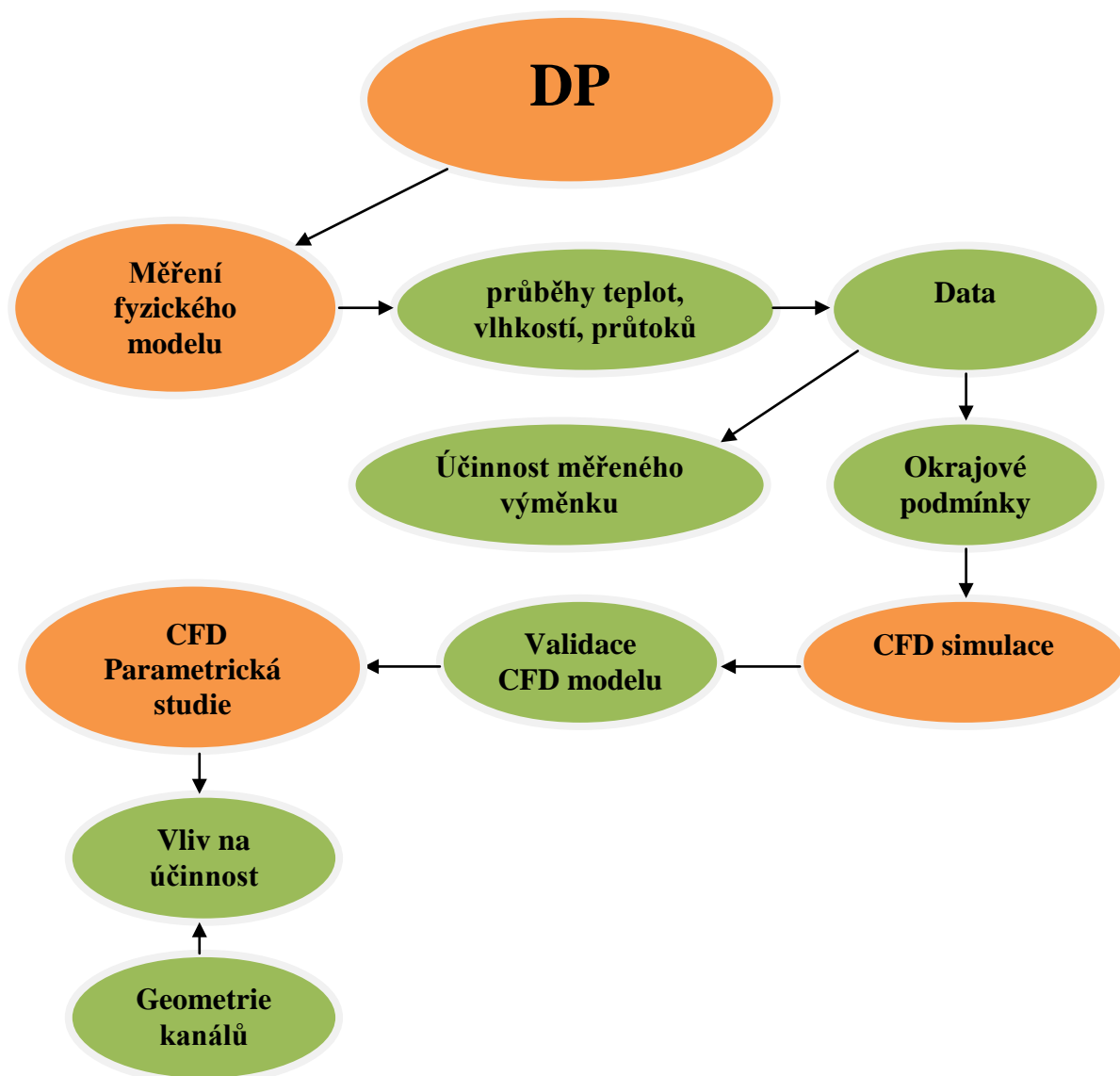
Geometrie kanálů

Pro provedení parametrická studie vlivu geometrie kanálů byl zvolen postup **CFD simulace**, neboť umožňuje modifikovat tvar kanálů pouze v elektronickém modelu bez nutnosti fyzické realizace výměníku.

POSTUP PŘI ŘEŠENÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Studie systému řízení a geometrie kanálů sestává z dílčích kroků, viz obr. 0.2. Na základě dat z měření fyzického modelu jednotky byly získány okrajové podmínky sloužící pro CFD simulaci. CFD simulace sestává z validace výpočtového modelu a následné parametrické studii, která probíhá na validovaném modelu. Výstupem CFD parametrické studie je zjištění vlivu geometrie kanálů a délky periody na účinnost ZZT.

Obr. 0.2: Přehled dílčích kroků k dosažení cílů práce

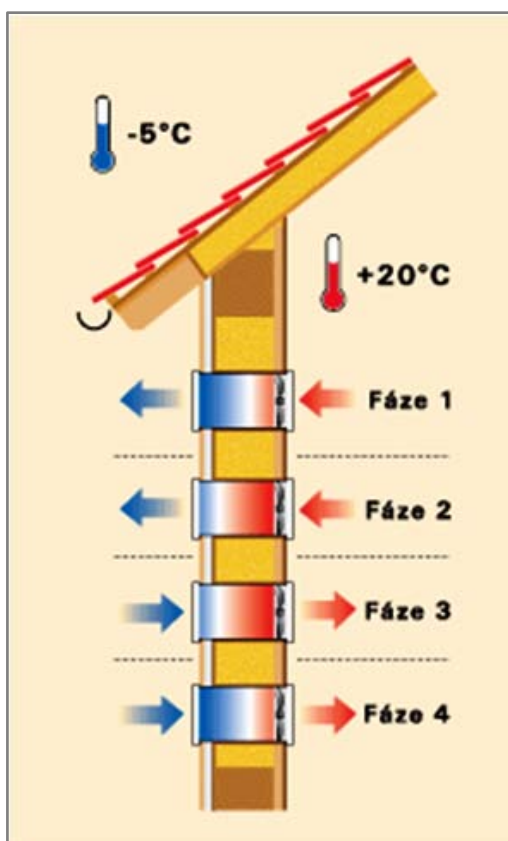


1 POPIS STUDOVANÉHO ZAŘÍZENÍ PRO ZZT

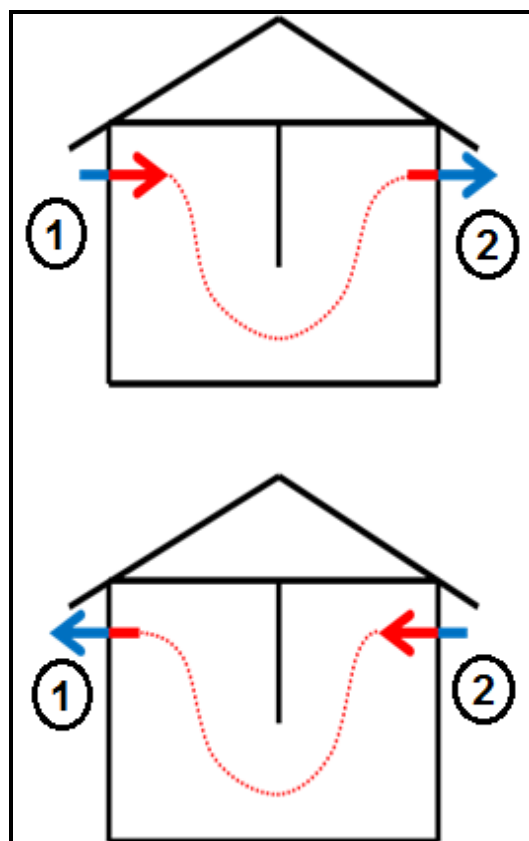
Zařízení (větrací jednotka) sestává z keramického tepelného výměníku, který je při praktickém používání zabudován do fasády domu a je osazen jedním reverzačním ventilátorem umístěným před výměníkem z vnitřní strany objektu. Ventilátor mění periodicky směr otáčení a tím i směr proudění vzduchu. Délka periody je výrobcem nastavena na 70 s.

Pracovní cyklus jednotky tvoří čtyři fáze (viz obr. 1.1):

- **Fáze 1:** vybitý výměník jednotky je nabíjen teplem obsaženým ve vzduchu odsávaného z místnosti
- **Fáze 2:** výměník je nabitý
- **Fáze 3:** reverzace chodu ventilátoru, vzduch začíná proudit opačným směrem, tj. nasává se dovnitř a ohřívá se teplem z nabitého výměníku, výměník se vybíjí
- **Fáze 4:** výměník je vybitý, celý cyklus se opakuje



Obr. 1.1: Pracovní cyklus jednotky [1]



Obr. 1.2: Princip provětrávání místnosti

Větrací jednotku je vždy třeba provozovat v páru s druhou jednotkou pro zajištění provětrávání místnosti. Venkovní vzduch je nasáván přes jednotku č. 1 (viz obr. 1.2), zároveň je v jednotce ohříván od nabitého tepelného výměníku, proudí skrze místnost do jednotky č. 2, kterou je odsáván z místnosti ven. Současně dochází k předávání tepla z proudícího vzduchu do vybitého výměníku jednotky č. 2. Po uplynutí doby jedné periody (tj. nabití resp. vybití výměníků jednotek) dojde k reverzaci chodu ventilátorů u obou jednotek a jednotka č. 2 začne nasávat venkovní

vzduch, kterému začne předávat teplo z nabitého výměníku. Zároveň jednotka č. 1 začne vzduch odsávat z místnosti a její vybitý výměník začne pohlcovat teplo obsažené ve vzduchu z místnosti, tzn. začne se nabíjet.

Praktická ukázka regeneračního výměníku popisované jednotky je na obrázku č. 1.3. Výměník pochází z vyráběné jednotky inVENTer TWIN [1].



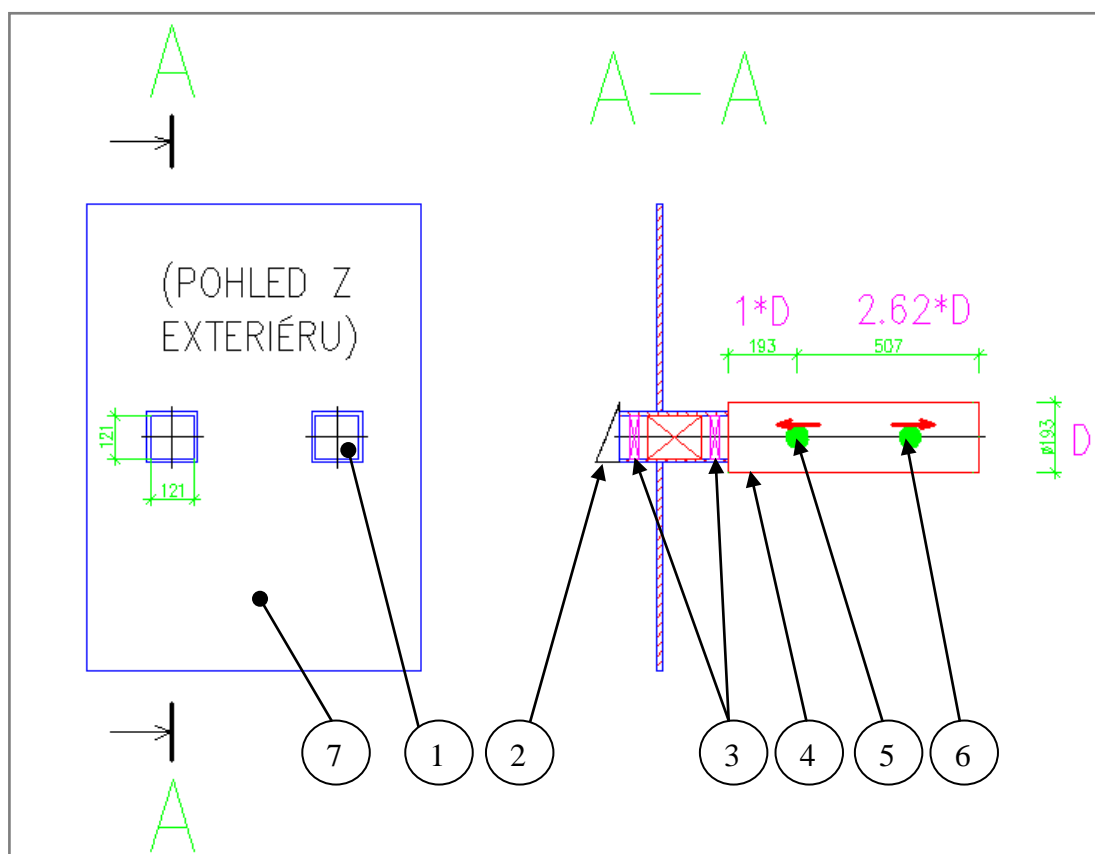
Obr. 1.3: Keramický výměník

2 MĚŘENÍ FYZICKÉHO MODELU VÝMĚNÍKU

Kapitola se zabývá měření charakteristik fyzického modelu regeneračního výměníku, který je součástí výše zmiňované větrací jednotky.

2.1 Návrh provedení experimentu

Při reálném nasazení je větrací jednotka většinou zabudována do otvoru v obvodové zdi domu. Nutnost zhotovit otvor do zdi a špatná přístupnost k výměníku z vnější strany vedla k modifikaci umístění a zabudování měřené jednotky do dřevotřískové desky, která byla vsazena do okenního rámu namísto okna. Do desky byly vyrobeny dva otvory a do otvorů zabudovány dva kanály čtvercového průřezu. Do prvního kanálu byl umístěn měřený výměník, druhý kanál sloužil k zajištění rovnotlakých podmínek vzduchu při větrání (tzn. jestliže byl vzduch přes výměník nasáván dovnitř, druhým otvorem byl odsáván ven a naopak). Snížení tepelných ztrát přes otvor bez výměníku bylo dosaženo vložím hliníkové voštiny, která se chová rovněž jako tepelný výměník.



Obr. 2.1: Návrh provedení experimentu

- 1..... otvor vyplněný hliníkovou voštinou
- 2..... venkovní kryt
- 3..... ventilátory
- 4..... potrubí pro měření rychlosti proudění vzduchu
- 5..... měřicí místo pro měření rychlosti proudění při **odsávání** vzduchu z místnosti
- 6..... měřicí místo pro měření rychlosti proudění při **nasávání** vzduchu do místnosti
- 7..... deska z dřevotřísky

Poznámka 2.1: Stanovení délky měřicího potrubí

Při určování **délky** měřicího potrubí bylo přistoupeno ke **kompromisu** mezi dvěma protichůdnými požadavky. Prvním požadavkem je jeho dostatečná délka pro zajištění ustálení profilu proudění vzduchu, což odpovídá desetinásobku vnitřního průměru potrubí D . Druhým požadavkem je co nejkratší délka potrubí. Dochází k ovlivnění měření period přepínání, kdy po skončení nasávání venkovního vzduchu je potrubí naplněno studeným vzduchem, který při reverzaci chodu a následnému odsávání vzduchu z místnosti ovlivňuje hodnotu naměřených teplot vzduchu v oblasti výměníku. Namísto odsávání vnitřního vzduchu dochází nejprve k vyprazdňování potrubí naplněného venkovním vzduchem a až následně k odsávání vzduchu vnitřního, což má negativní dopad na naměřené hodnoty. Výměník tedy není po přechodnou dobu nabíjen vnitřním vzduchem. Dalším argumentem pro použití kratší délky potrubí než $10 \cdot D$ je fakt, že ani při praktické instalaci do obvodové zdi domu není za výměníkem z vnitřní strany dlouhý úsek potrubí (prakticky je cca. 75 mm).

Výsledná délka potrubí je výsledkem použití cenově dostupného potrubí o délce 700 mm. Měřicí místa jsou dvě, první pro měření rychlosti při nasávání vzduchu dovnitř místnosti a druhé při odsávání vzduchu ven z místnosti. Před měřicím místem je vždy dodržena vzdálenost $2,62 \cdot D$, sloužící alespoň k částečnému ustálení profilu proudu vzduchu a za měřicím místem vzdálenost $1 \cdot D$, zajišťující minimalizaci vlivu geometrických změn průřezu na proudění.

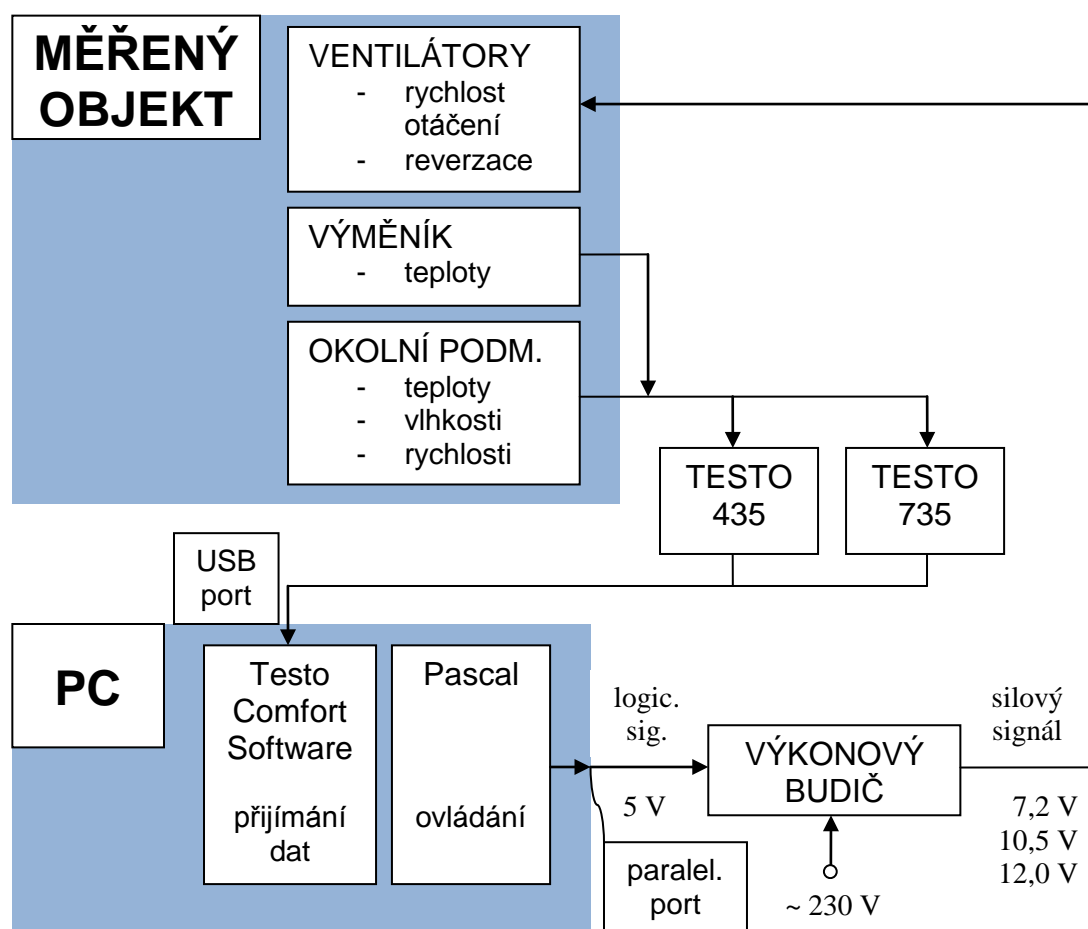
2.2 Použité přístroje a jejich rozmístění

Ke sběru dat byla vytvořena kombinovaná ovládací a měřicí sestava.

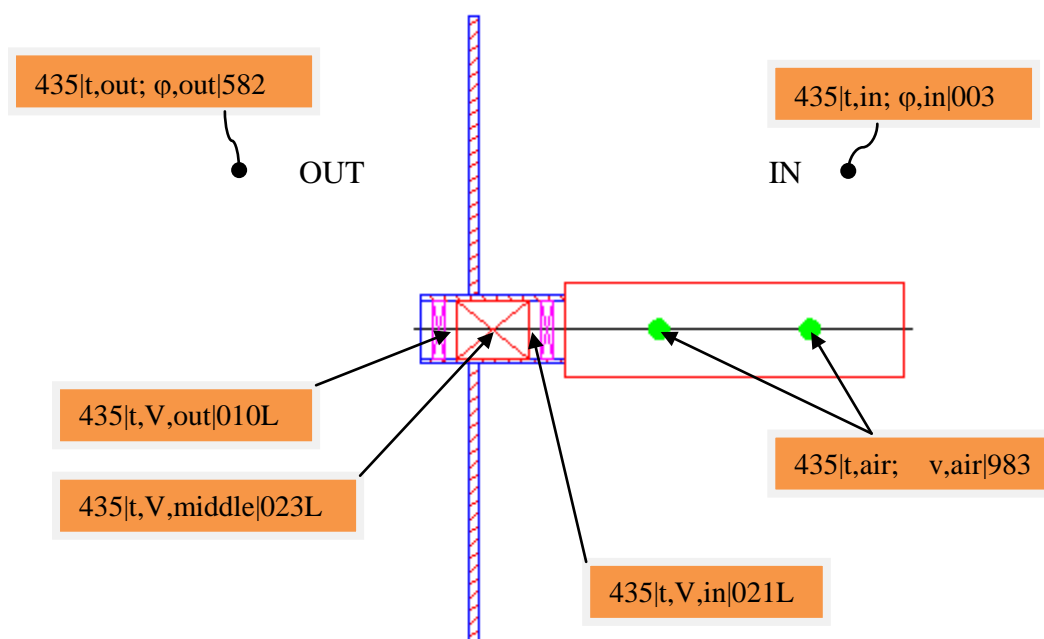
Ovládací část slouží k reverzaci chodu ventilátorů a nastavování jejich otáček pomocí změny svorkového napětí. Sestává z PC, ovládacího softwaru vytvořeného v jazyce Pascal (viz příloha č. 1), výkonového budiče, převádějícího výstupní signál logické úrovně vystupující z PC na signál výkonový, jež ovládá ventilátory. Výkonový budič byl sestaven ze stabilizovaného zdroje napětí, plynule nastavitelného v rozsahu 0 až

30 V a soustavy integrovaného obvodu L293D a čtyřech relé. Jednotlivé úrovně napětí byly nastavovány manuálně pomocí ovládacích prvků zdroje.

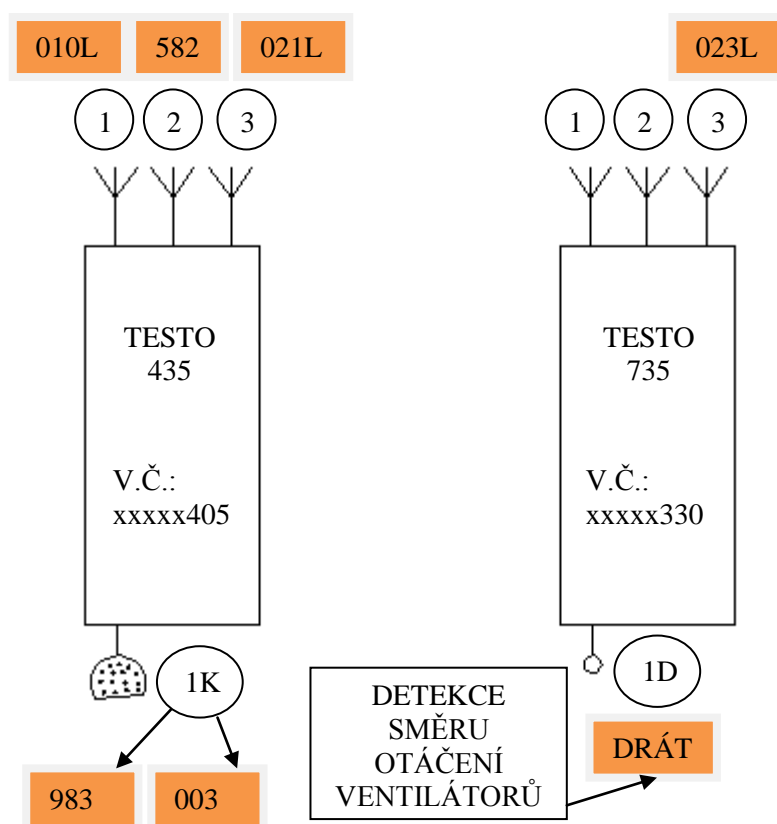
Měřicí část slouží k měření a sběru dat. Sestává ze sond měřících teploty, vlhkosti a rychlosti proudění. Dalšími komponenty jsou měřicí přístroje TESTO 435 a TESTO 735. Přístroje převádí signál z měřicích sond na hodnotu teplot a data odesílají do PC. V PC jsou data přijímána pomocí software Testo Comfort Software a zpracována v aplikaci MS Excel.



Obr. 2.2: Schéma měřicí sestavy



Obr. 2.3: Detailní zapojení měřicích sond



Obr. 2.4: Propojení sond a měřicích přístrojů

Multifunkční měřicí přístroj TESTO 435 disponuje možností připojení tří bezdrátových sond a jedné kombinované sondy. Kombinovaná sonda umožňuje měření více veličin zároveň. V zapojení dle obrázku č. 2.4 byly využity všechny tři bezdrátové vstupy (označeny čísly 1, 2, 3) a konektor pro kombinovanou sondu (označení 1K) byl využit na začátku měření sondou č. 983, kterou byly naměřeny dílčí rychlosti proudění po průřezu potrubí. V zápětí byla sonda vyjmuta a nahrazena sondou č. 003. Výše uvedenou sondou byly měřeny parametry vnitřního vzduchu, konkrétně teplota a vlhkost a to po celou dobu měření křivek cyklování a křivek nabíjení a vybíjení.

Tříkanálový teploměr TESTO 735 umožňuje měřit teploty třemi bezdrátovými sondami a jednou drátovou sondou (sonda se připojuje k teploměru pomocí kabelu). Vstup pro drátovou sondu je na obrázku č. 2.4 označen symbolem 1D. V zapojení dle obrázku č. 2.4 byly využity dva vstupy, jeden bezdrátový a druhý drátový.

Poznámka 2.2: Identifikace směru otáčení ventilátorů

Termočlankový vstup 1D pro drátovou sondu byl využit ke zjišťování směru otáčení ventilátorů (nasávání/odsávání vzduchu do/z místnosti). Vstup sestává ze dvou pinů. V zapojení s termočlankem reaguje teploměr na změnu napětí na spoji dvou kovů resp. na změnu napětí mezi těmito dvěma piny. Bylo zjištěno, že při odporu mezi piny $180\ \Omega$ ukazuje teploměr hodnotu $16\ ^\circ\text{C}$ a při odporu $33\ \text{k}\Omega$ ukazuje $-20\ ^\circ\text{C}$. Obvod s termočlankem byl nahrazen obvodem s rezistorem $33\ \text{k}\Omega$ a se spínacím relé. Aby bylo dosaženo co nejmenšího počtu použitých součástek, bylo namísto použití rezistoru $180\ \Omega$ přistoupeno k rozpojení obvodu, ke kterému docházelo při nasávání vzduchu do místnosti. Při odsávání vzduchu z místnosti do venkovního prostředí bylo relé sepnuto a obvodem začal protékat proud přes rezistor $33\ \text{k}\Omega$. Takto bylo možno jednoznačně a přesně identifikovat směr otáčení ventilátorů a okamžik přepnutí z jednoho směru otáčení na druhý.

Poznámka 2.3: Vyřešení problému nespolehlivé funkce výkonového budiče

Po fyzickém sestavení obvodu výkonového budiče (dále je VB) docházelo k jeho nespolehlivé funkci.

Správná funkce: po příchodu signálu z paralelního portu počítače (dále jen PPP) VB změnil směr otáčení ventilátorů.

Funkce VB po sestavení: po příchodu signálu z PPP VB přepne směr otáčení ventilátorů, ovšem po uběhnutí doby přibližně 5 s dojde k zastavení chodu ventilátorů. V některých případech po příchodu signálu z PPP dojde sice k zastavení ventilátorů pro jeden směr, ale nedojde již vůbec k rozběhnutí ventilátorů pro směr druhý.

Příčina problému: Při vypínání ventilátorů dochází na jejich vinutích k napěťovým zákrmitům. Zákrmity způsobují změnu úrovně logického signálu vystupujícího z PPP, tento signál je v zápětí držen na nesprávné úrovni po celou dobu do další změny stavu úrovně signálu (tzn. do dalšího přepnutí).

Řešení problému: Byl vložen keramický kondenzátor o hodnotě $100\ \text{nF}$ paralelně k napájení integrovaného obvodu L293D. První pin kondenzátoru byl připojen k napájení $+5\text{V}$ a druhý pin k zemi (GND).

2.3 Obecná metodika zaznamenávání dat při měření

Při každém měření bylo nejdříve nutno spustit a nastavit všechny přístroje. Nejprve byl zapnut počítač se systémem MS Windows XP, dále stabilizovaný zdroj napětí pro výkonový budič. Univerzální měřicí přístroj TESTO 435 bylo možno zapnout ihned po startu systému MS Windows v počítači, teploměr TESTO 735 až po zapnutí ventilátorů, viz poznámka níže. Spuštění ventilátorů zajistilo spuštění programu Perioda_prepinani.exe, vytvořeného v jazyce Pascal. Po zadání vstupních hodnot, jako jsou počet délek period měření, délka jednotlivých period a počet opakování každé periody došlo ke spuštění chodu ventilátorů.

Záznam dat z měření byl prováděn pomocí softwaru Testo Comfort Software. Bylo třeba spustit aplikaci, nastavit rozpoznání přístrojů a vzorkovací periodu. Vzorkovací perioda byla nastavena na hodnotu 1 s. Začátek a konec měření byl určen kliknutím na tlačítko Start respektive Stop.

Po skončení měření byla data z Testo Comfort Software vyjmuta pomocí schránky počítače (pomocí příkazu kopírovat, klávesová zkratka Ctrl + C v této aplikaci nefunguje) a vložena do aplikace MS Excel, kde došlo k jejich následnému zpracování.

Poznámka 2.4: Zapínání teploměru TESTO 735

Teploměr TESTO 735 bylo nutno spustit v uvedené konfiguraci (viz kapitola 2.2) při stavu přepnutí ovládacích relé ventilátorů takovém, kdy je obvod sepnut přes rezistor 33 kΩ. Jinak teploměr nenačte svorku 1D (viz obrázek č. 2.4) a nedochází k detekci směru otáčení ventilátorů.

2.4 Naměřená data a jejich vyhodnocení

Měření byla uskutečněna ve dvou sériích, přičemž každá série probíhala v jiném období.

Tab. 2.1: Časové období jednotlivých měření

číslo série	období měření
1	prosinec 2011 – leden 2012
2	únor 2012

2.4.1 Rychlosti proudění – průtoky vzduchu

Cílem měření rychlostí proudění bylo stanovení objemových průtoků vzduchu jednotkou a to pro tři hodnoty průtoků vzduchu, resp. tři hodnoty napětí na ventilátorech tzn. 12,0 V; 10,5 V a 7,2 V. Měření byla provedena pro oba směry proudění vzduchu přes jednotku, tzn. pro odsávání i nasávání z/do místnosti.

Metodika měření

Pro měření průtoků vzduchu byla využita metoda měření lokálních rychlostí v průřezu potrubí. Základ této metody spočívá v měření lokálních rychlostí v průřezu potrubí (viz obr. 2.1 – položka 4) a následný výpočet střední rychlosti proudu, ze které se určí objemový průtok vzduchu potrubím.

Obě série měření byly provedeny navzájem odlišnou metodikou.

Série č. 1

Stanovení objemového průtoků vzduchu jednotkou bylo realizováno na základě metody ekvidistantních poloměrů. Metoda spočívá v rozdělení poloměru potrubí na ekvidistantní kružnice, vypočtené dle vztahu [2]:

$$r_i = R \sqrt{\frac{(2i - 1)}{2e}} \quad (2.1)$$

kde	r_i [mm]	je i-tá velikost poloměru mezikruží
	R [mm]	je vnitřní poloměr měřicího potrubí
	i [-]	je i-tý poloměr mezikruží
	e [-]	je počet ekvidistantních poloměrů, na které je poloměr potrubí rozdělen

Metoda tedy rozdělí průřez potrubí na „i“ částí, z nichž má každá stejnou velikost průřezu. Samotný výpočet střední rychlosti proudění pak spočívá pouze ve stanovení aritmetického průměru z naměřených hodnot v jednotlivých bodech průřezu.

V sérii č. 1 bylo zvoleno osm ekvidistantních poloměrů ($n = 8$), celkem včetně měřicího bodu v ose potrubí bylo měřících bodů po poloměru 9.

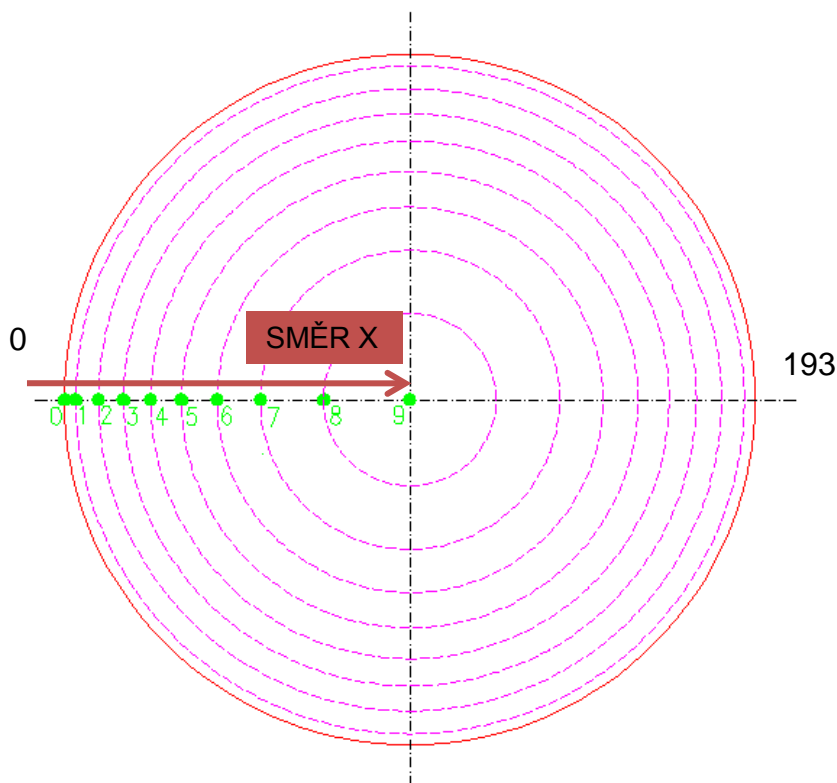
Tab. 2.2: Dílčí poloměry měření, série č. 1, vzdálenost bodů od osy, viz obr. 2.7

i	-	0 (osa)	1	2	3	4	5	6	7	8	9 (stěna)
r_i	mm	0.0	24.1	41.8	53.9	63.8	72.4	80.0	87.0	93.4	96.5

Tab. 2.3: Dílčí poloměry měření, série č. 1, vzdálenost bodů od stěny, korekce na obrázek 2.5

i_{kor}	-	0 (stěna)	1	2	3	4	5	6	7	8	9 (osa)
r_i	mm	0.0	3.1	9.5	16.5	24.1	32.7	42.6	54.7	72.4	96.5

Tabulka 2.3 je modifikovanou verzí tabulky 2.2. Došlo ke korekci číslování dílčích poloměrů tak, aby jejich označení souhlasilo s označením bodů v obrázku 2.5. K modifikaci bylo přistoupeno z důvodu praktičtějšího označení sondy pro měření rychlosti, viz. obr. 2.7.



Obr. 2.5: Metodika měření lokálních rychlostí u série měření č. 1

Poznámka 2.5: Zjednodušení metodiky měření v sérii č. 1

Z obrázku 2.5 je patrné zjednodušení metodiky měření, kdy měřicí body nepostihují celý průřez potrubí. Pro zjištění vlivu tohoto zjednodušení byla později provedena druhá série měření, ve které byl již průřez potrubí proměřen přes celý jeho průměr, viz níže v textu).

Série č. 2

Výpočet objemového průtoku vzduchu jednotkou byl realizován pomocí metodou konstantních poloměrů. Metoda spočívá v rozdělení poloměru (nikoliv průřezu!) potrubí na stejné části.

$$r_i = i \frac{2R}{2(n+1) - 1} \quad \text{pro } i = 1 \text{ až } (n-1) \quad (2.2)$$

$$r_i = R \quad \text{pro } i = n \quad (2.3)$$

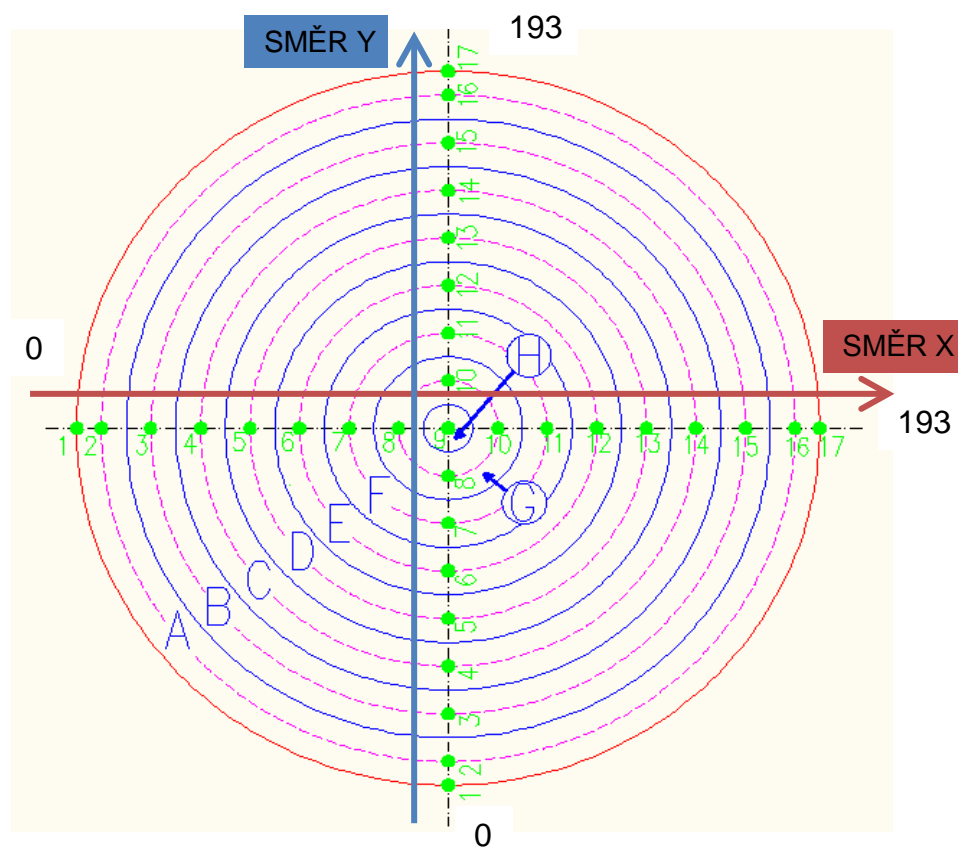
V sérii č. 2 bylo zvoleno sedm poloměrů ($n = 7$), celkem včetně měřicího bodu v ose potrubí bylo měřících bodů po poloměru osm (body č. 2 až 9). Výsledné hodnoty poloměrů měření jsou vypočteny v tabulce 6.4.

Tab. 2.4: Dílčí poloměry měření, série č. 2, vzdálenost bodů od osy

i	-	1 (osa)	2	3	4	5	6	7	8	9 (stěna)
r_i	mm	0.0	12.9	25.7	38.6	51.5	64.3	77.2	90.1	96.5

Tab. 2.5: Dílčí poloměry měření, série č. 2, vzdálenost bodů od stěny, korekce na obrázek 2.8

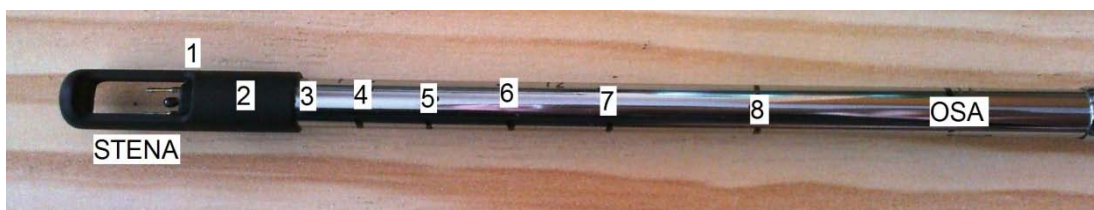
i_{kor}	-	1 (stěna)	2	3	4	5	6	7	8	9 (osa)
r_i	mm	0.0	6.4	19.3	32.2	45.0	57.9	70.8	83.6	96.5



Obr. 2.6: Metodika měření lokálních rychlostí u série měření č. 2

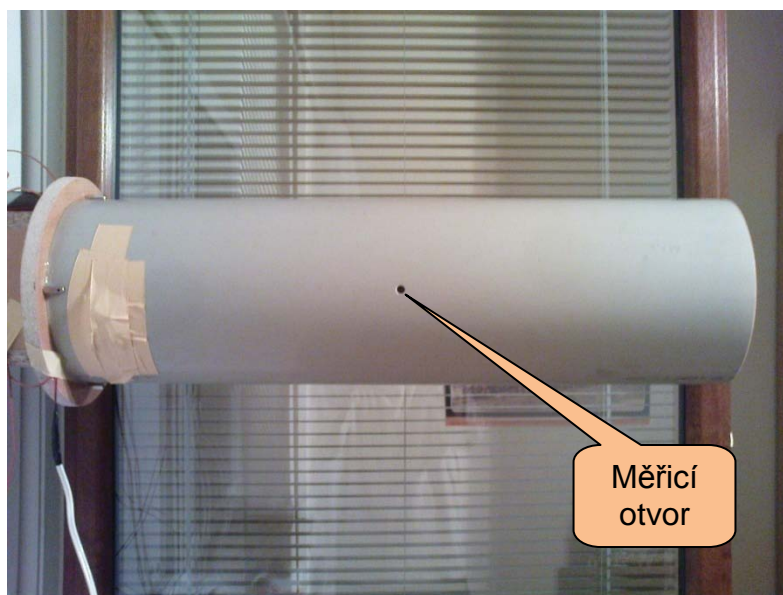
Rozložení měřicích bodů se vyznačuje jejich konstantní vzdáleností mezi sebou, ovšem navzájem se liší velikosti jednotlivých průřezů (průřezy A až G – viz obrázek 2.6), pro které byly naměřeny rychlosti proudění. Výsledná velikost objemového průtoku vzduchu se stanoví na základě vážení naměřené rychlosti velikostí průřezu, ve kterém byla rychlost naměřena. Jinými slovy: naměřenou rychlost v daném dílčím průřezu vynásobíme velikostí tohoto dílčího průřezu.

Do porubí byla zavedena kombinovaná sonda TESTO (viz obrázek č. 2.3 - 435|t,air; v,air|983 a viz obrázek 2.7) umožňující měřit rychlost proudění a teplotu vzduchu zároveň. Pro účel měření rychlosti byla využita pouze funkce měření rychlosti.

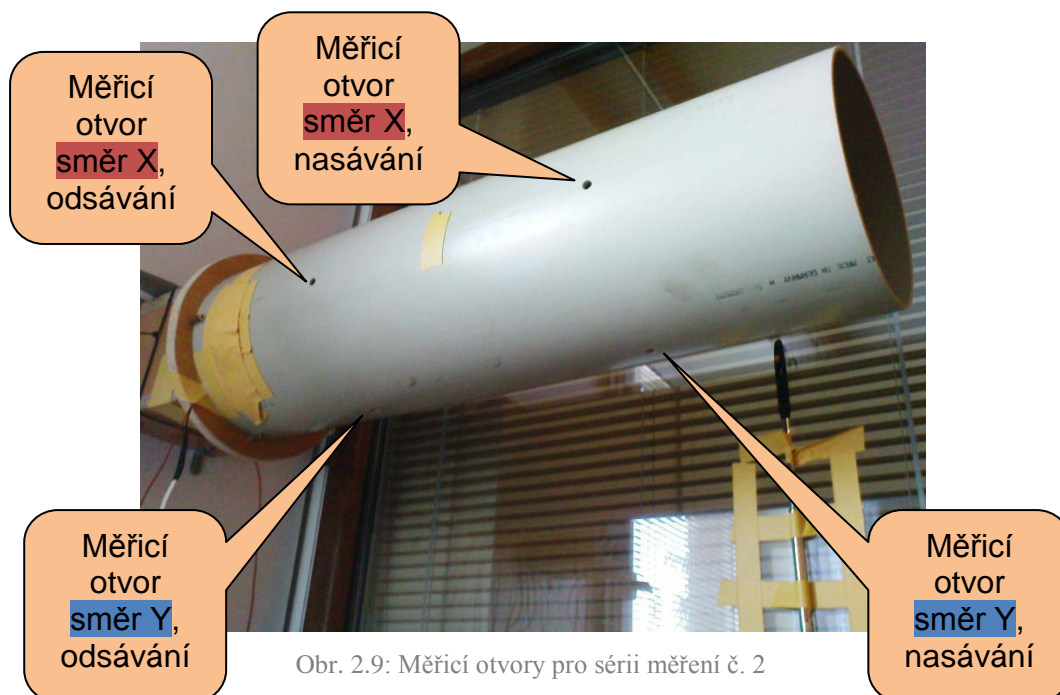


Obr. 2.7: Kombinovaná sonda TESTO - rychlost, teplota

V sérii č. 1 byl použit pouze jediný měřicí otvor, viz obrázek 2.8. Obrázek 2.9 ukazuje umístění měřicích otvorů v sérii měření č. 2. Namísto jednoho otvoru byly použity čtyři, viz poznámka 2.1 a poznámka 2.5.



Obr. 2.8: Měřicí otvor pro sérii měření č. 1



Obr. 2.9: Měřicí otvory pro sérii měření č. 2

V každém místě měření byla rychlost proudění vždy změřena 4 x a následně stanovena střední hodnota rychlosti. Pro napětí na ventilátorech 12,0 V byl profil proudění proměřen ve všech vyznačených bodech. Pro napětí 10,5 V a 7,2 V byla rychlost změřena pouze v ose potrubí (viz obrázek 2.5 – bod měření č. 9) a střední rychlost následně určena z faktoru profilu PF, viz následující text. Zjednodušení se později ukázalo jako nevhodné, neboť při sérii měření č. 2 bylo zjištěno, že profil proudění je po průřezu potrubí značně nerovnoměrný a závislý na rychlosti proudění. Nerovnoměrnost a závislost tvaru profilu proudění na střední rychlosti proudění je dána měření v potrubí, jehož délka nedosahuje potřebné délky pro zajištění ustálení profilu proudění, viz poznámka č. 2.1.

Mezi jednotlivými měřeními došlo vždy k odstavení chodu ventilátorů a po jejich zastavení k opětovnému rozběhu. Od začátku rozběhu do začátku měření bylo vyčkáno 10 s pro zajištění ustálení proudění v měřeném systému (viz níže). Samotné měření rychlosti v konkrétním bodě průřezu probíhalo vždy po dobu 10 s.

Stanovení doby potřebné k ustálení proudění

Pro určení doby, po kterou je nutno vyčkat, nežli dojde k ustálení proudění a aby následně mohlo být přistoupeno k zahájení měření, byla zvolena následující metoda. Měřicí sonda byla umístěna do osy potrubí. Výchozím stavem byly vypnuté ventilátory a tedy i nulová rychlost proudění. Po zapnutí ventilátorů byla měřena rychlost v ose potrubí po dobu 90 s. Vyhodnocení dat sestává z výpočtu aritmetického průměru naměřeného souboru rychlostí a výběrové směrodatné odchylky.

$$\bar{w} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i \quad (2.4)$$

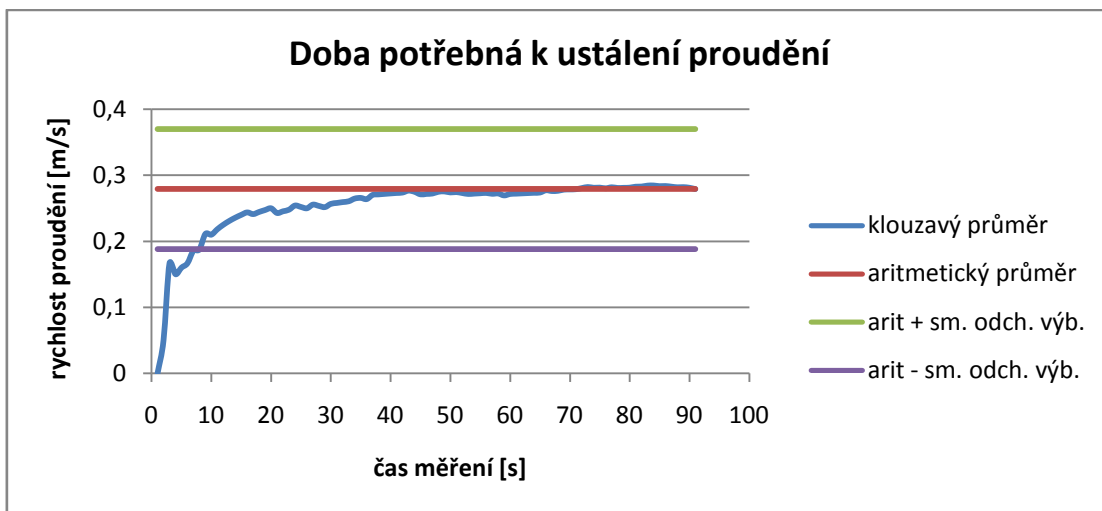
kde \bar{w} [m/s] je aritmetický průměr rychlosti proudění
 n [-] je počet měření
 w_i je i -tá naměřená lokální hodnota rychlosti proudění

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^2}{(n - 1)} \quad (2.5)$$

kde s [m/s] je směrodatná výběrová odchylka

Podmínka: Jestliže je hodnota aritmetického průměru naměřeného souboru rychlostí v intervalu $\langle \bar{x} + s; \bar{x} - s \rangle$, lze považovat proudění v systému za ustálené a je možné provádět měření.

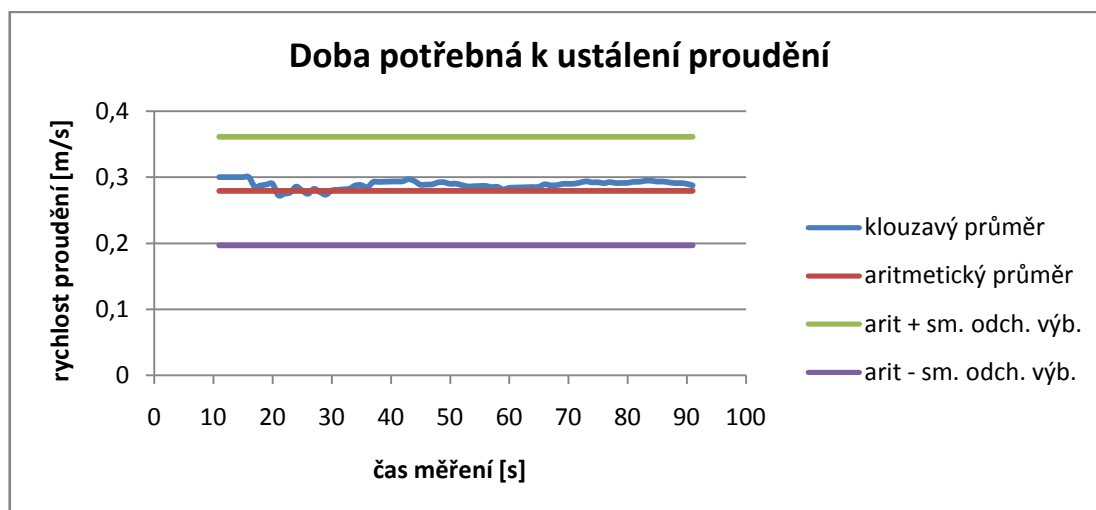
Z obrázku 2.10 vyplývá, že měření je možno zahájit po době přibližně 10 s od spuštění ventilátorů.



Obr. 2.10: Doba potřebná k ustálení proudění *se započtením* prvních 10 s měření

Pro co nejtěsnější přiblížení se klouzavého průměru k aritmetickému průměru byly hodnoty za prvních 10 s měření od spuštění ventilátorů vynechány a až následně počítán klouzavý průměr, viz obrázek 2.11. Z něj je patrné, že po uběhnutí doby 10 s od začátku měření je proudění již téměř ustáleno a je možno zahájit měření. Při další práci bylo vycházeno právě z přístupu vyobrazeného na obrázku 2.11.

Měření tedy bylo v každém měřeném bodě zahájeno vždy až po umístění sondy do měřeného místa, následném zapnutí ventilátorů a vyčkání po dobu 10 s, nutné k ustálení proudění vzduchu v systému.

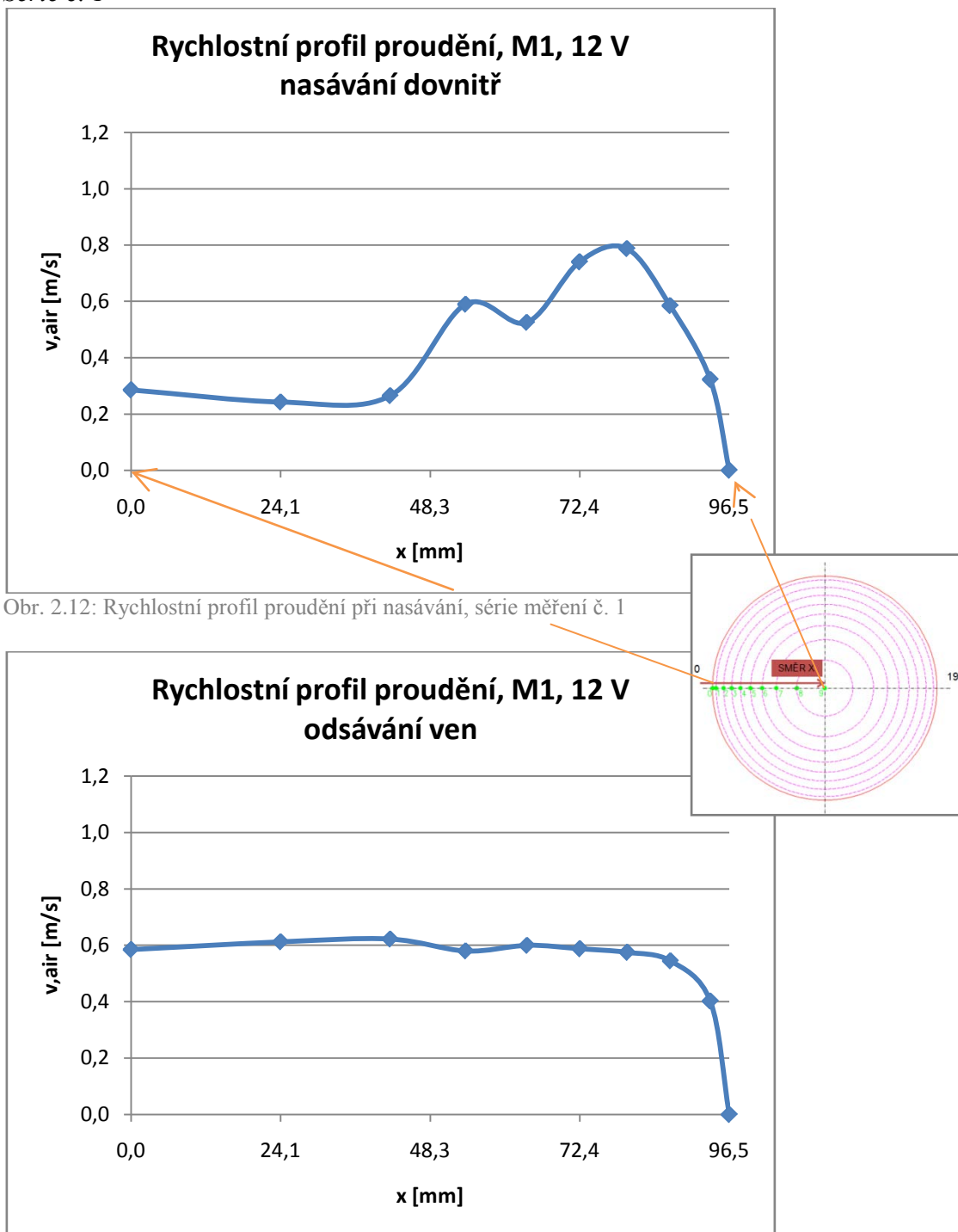


Obr. 2.11: Doba potřebná k ustálení proudění *bez započtení* prvních 10 s měření

Naměřená data

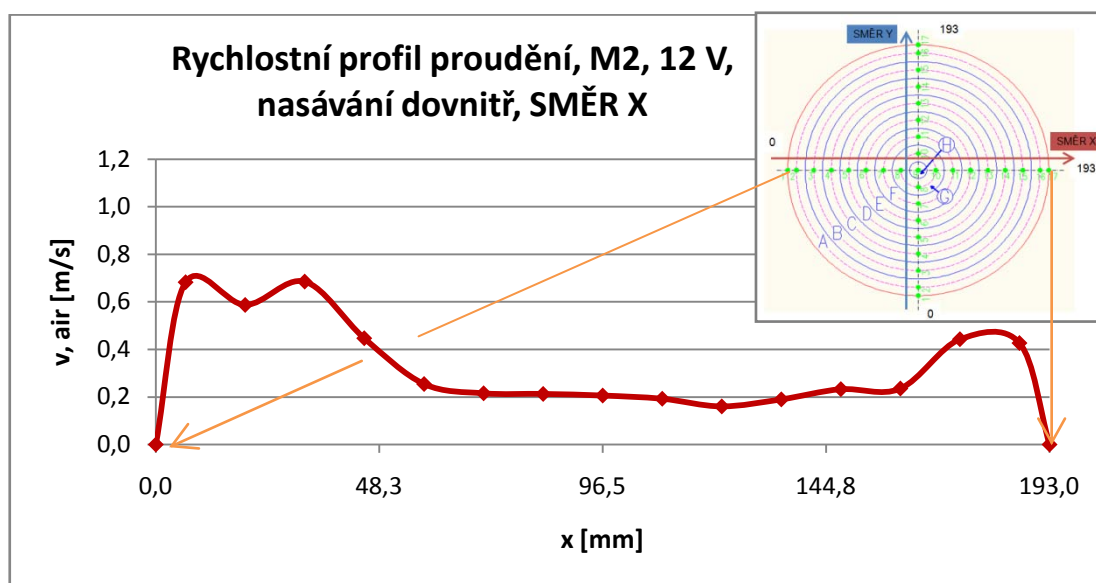
Na základě naměřených hodnot rychlostí proudění v jednotlivých bodech průřezu byly zhotoveny grafy rychlostních profilů napříč potrubím.

Série č. 1

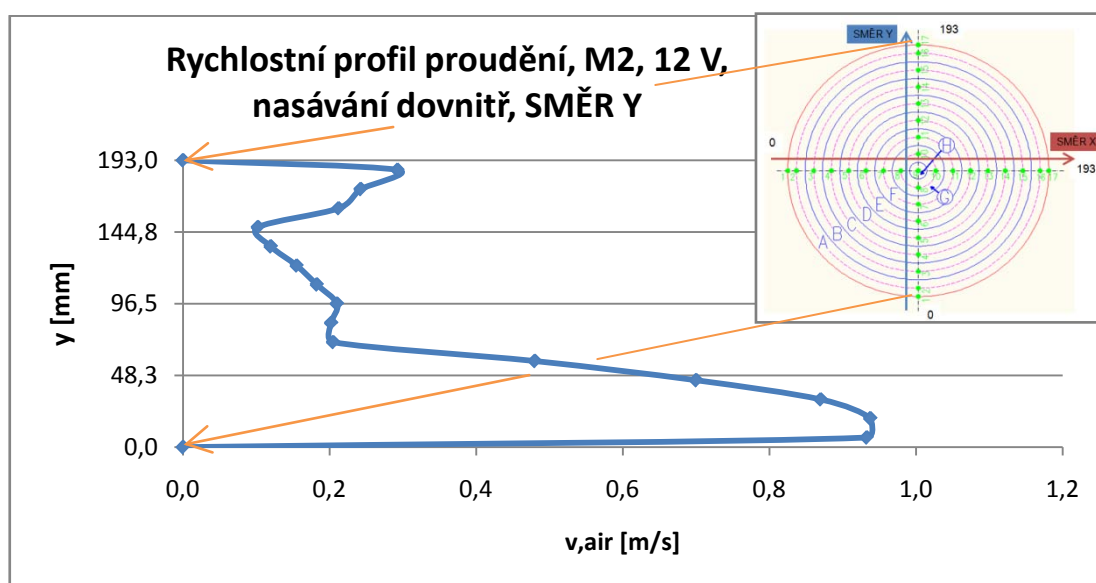


kde M1 je symbol pro sérii měření č. 1
 v_{air} [m/s] je rychlost proudění vzduchu
 x [mm] je vzdálenost měřicí sondy od vnitř. okraje potrubí ve směru X

Série č. 2



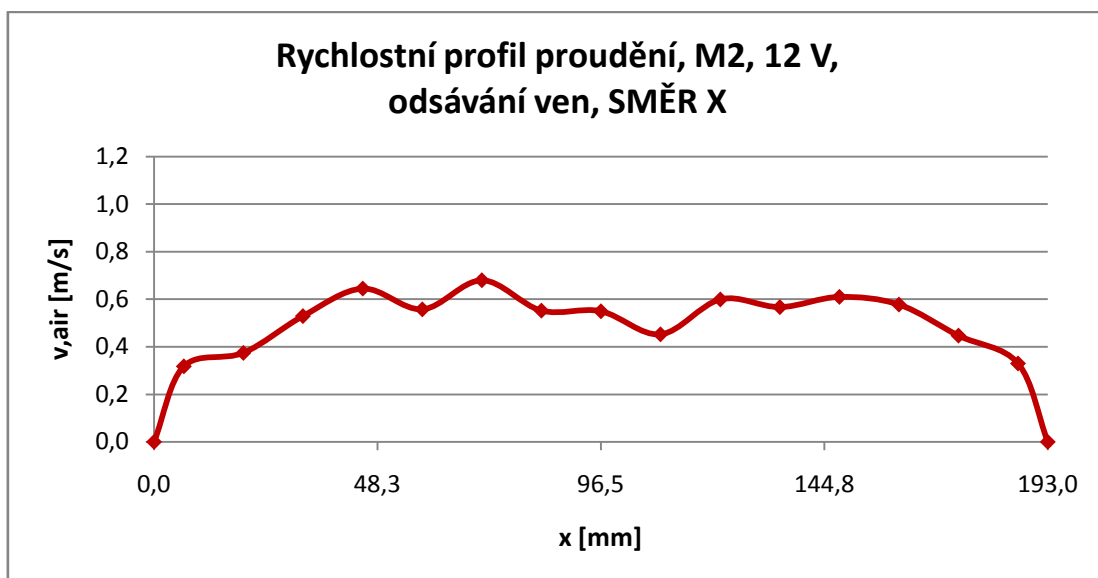
Obr. 2.14: Rychlostní profil proudění při nasávání, směr X, série měření č. 2



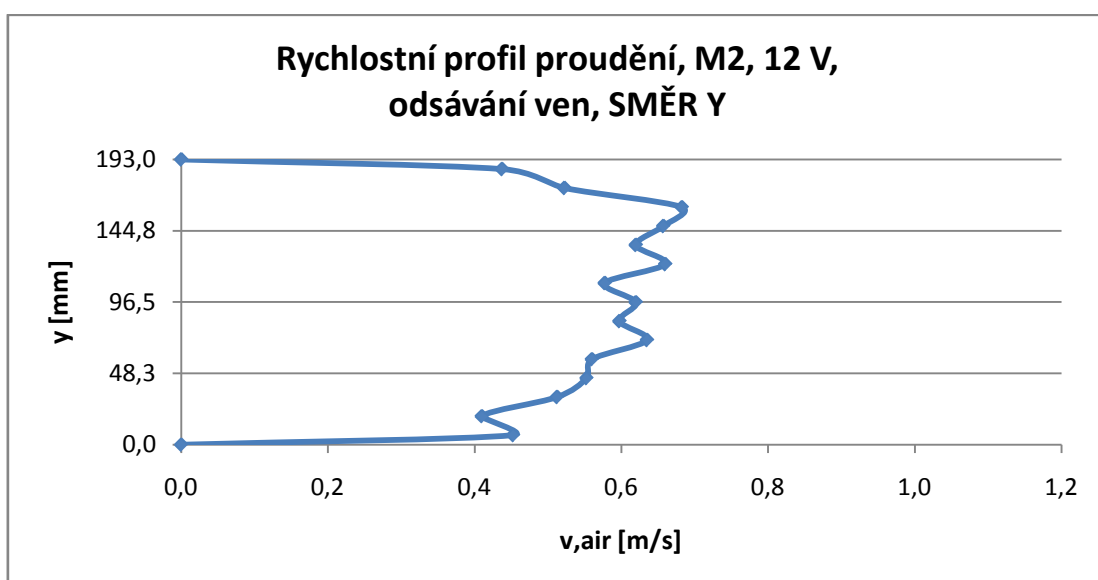
Obr. 2.15: Rychlostní profil proudění při nasávání, směr Y, série měření č. 2

kde M2 je symbol pro sérii měření č. 2
 $y [\text{mm}]$ je vzdálenost měřicí sondy od vnitř. okraje potrubí ve směru Y

Na obr. 2.15 lze vidět v profilu proudění dvě špičky. Špičky jsou způsobeny usměrněním proudu vzduchu tvarem lopatek ventilátoru na vnitřní straně výměníku, který byl v režimu nasávání vzduchu dovnitř vypnut a netočil se. Dolní špička je vlivem neizotermnosti proudu vzduchu větší než špička horní.



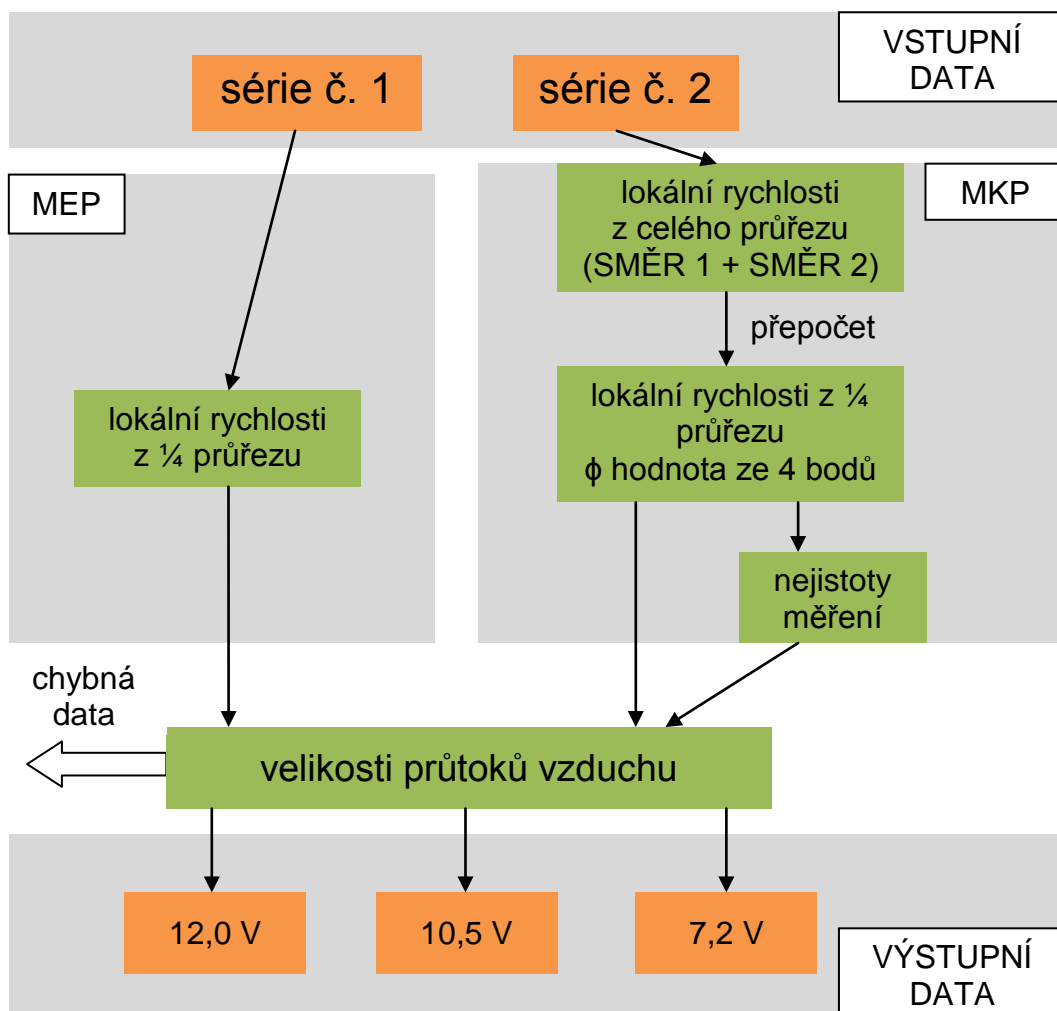
Obr. 2.16: Rychlostní profil proudění při odsávání, směr X, série měření č. 2



Obr. 2.17: Rychlostní profil proudění při odsávání, směr Y, série měření č. 2

Vyhodnocení dat

Vyhodnocení dat probíhalo pro jednotlivé série měření odlišně. U série č. 1 bylo možno ihned vypočíst velikosti průtoků vzduchu z naměřených hodnot, neboť metoda ekvidistantních poloměrů (MEP) dává výsledky na základě výpočtu aritmetického průměru z naměřených lokálních rychlostí. Při vyhodnocování dat ze série č. 2 byla situace složitější. Bylo naměřeno více hodnot a byla použita metoda konstantních poloměrů (MKP). Výpočet sestává z výpočtu průměrné lokální rychlosti proudění v daném dílčím průřezu potrubí (viz obrázek č. 2.6). Dále je postupováno podobně jako u metody MEP, viz následující text. Navíc byly vypočteny nejistoty měření a z nich stanoveny rozsahy, ve kterých se mohou skutečné hodnoty rychlostí nacházet resp. ve kterých se může nacházet střední hodnota rychlosti proudění. U série měření č. 2 se vyskytl problém při přepočtu rychlostí pro snížené napětí pomocí faktoru profilu PF, tato data byla vyřazena a dále nebyla brána v potaz.



Obr. 2.18: Schéma postupu při stanovení velikosti objemových průtoků vzduchu jednotkou

kde MEP je metoda ekvidistantních poloměrů
MKP je metoda konstantních poloměrů

Série č. 1 – metoda MEP

Z naměřených hodnot lokálních rychlostí byla stanovena pomocí aritmetického průměru střední hodnota rychlosti proudění, viz rovnice 2.4.

$$\bar{w} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i$$

Celkový průtok potrubím:

$$V_{12,0 \text{ V}} = w_{\text{stř}, 12,0 \text{ V}} \cdot S \quad (2.6)$$

kde $V_{12,0 \text{ V}} [\text{m}^3/\text{s}]$ je objemový průtok potrubím při napětí 12,0 V
 $w_{\text{stř}, 12,0 \text{ V}} [\text{m/s}]$ je střední rychlost proudění potrubím při napětí 12,0 V
 $S [\text{m}^2]$ je průřez měřicího potrubí

$$S = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.7)$$

kde $D [\text{m}]$ je vnitřní průměr měřicího potrubí

Faktor profilu PF:

$$PF = \frac{w_{\text{stř}, 12,0 \text{ V}}}{w_{\text{osa}, 12,0 \text{ V}}} \quad (2.8)$$

kde $w_{\text{osa}, 12,0 \text{ V}} [\text{m/s}]$ je lokální hodnota rychlosti v ose potrubí při
 $U = 12,0 \text{ V}$

Střední hodnota rychlosti při napětí sniženém na 10,5 V:

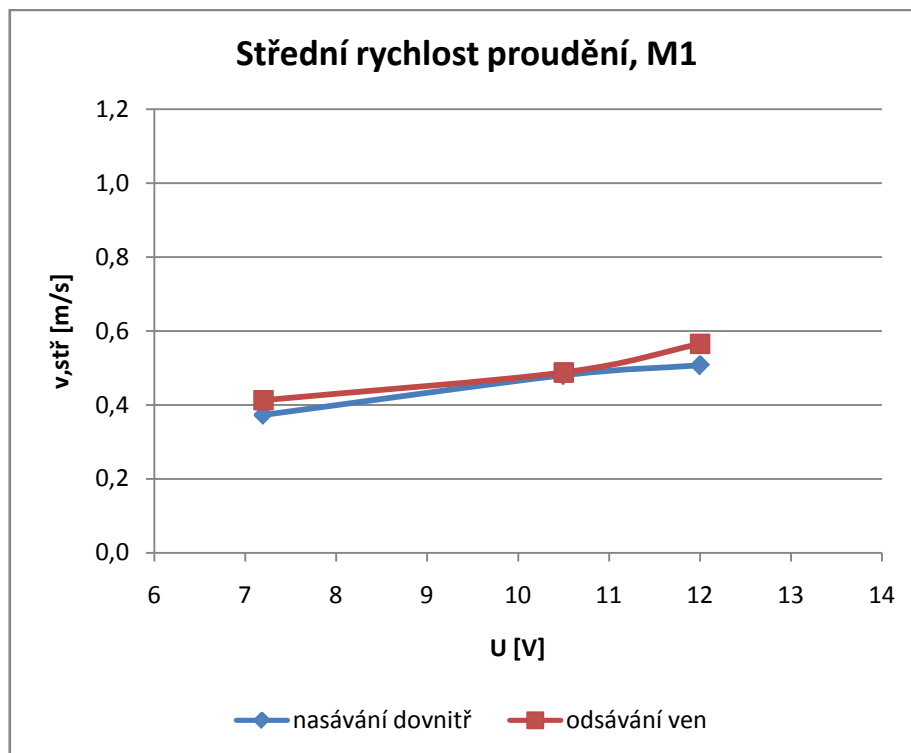
$$w_{\text{stř}, 10,5 \text{ V}} = PF \cdot w_{\text{osa}, 10,5 \text{ V}} \quad (2.9)$$

kde $w_{\text{osa}, 10,5 \text{ V}} [\text{m/s}]$ je lokální hodnota rychlosti v ose potrubí při
 $U = 10,5 \text{ V}$

Střední hodnota rychlosti při napětí sniženém na 7,2 V:

$$w_{\text{stř}, 7,2 \text{ V}} = PF \cdot w_{\text{osa}, 7,2 \text{ V}} \quad (2.10)$$

kde $w_{\text{osa}, 7,2 \text{ V}} [\text{m/s}]$ je lokální hodnota rychlosti v ose potrubí při $U = 7,2 \text{ V}$



Obr. 2.19: Střední rychlost proudění vzduchu přes jednotku v závislosti na napětí, série měření č. 1

Tab. 2.6: Číselné hodnoty rychlostí proudění vzduchu, série měření č. 1

střední hodnota			
směr proudění		DOVNITŘ	
napětí na ventilátoru	rychlost v ose proudu	střední rychlost proudu	faktoru profilu
U	w,n	w,str	PF
V	m/s	m/s	-
12	0.29	0.51	1.78
10.5	0.27	0.48	1.78
7.2	0.21	0.37	1.78

střední hodnota			
směr proudění		VEN	
napětí na ventilátoru	rychlost v ose proudu	střední rychlost proudu	faktoru profilu
U	w,n	w,str	PF
V	m/s	m/s	-
12	0.59	0.57	0.97
10.5	0.51	0.49	0.97
7.2	0.43	0.41	0.97

Lze předpokládat, že při snižujícím se napětí na ventilátorech se bude klesat střední rychlost proudění vzduchu. Z obrázku 2.19 je vidět, že při snižujícím se napětí na ventilátorech klesá střední rychlost proudění vzduchu jednotkou. Výsledky výpočtů lze tedy kvalitativně považovat za správné.

Poznámka 2.6: Závislost střední rychlosti proudění vzduchu přes jednotku na napětí na ventilátorech

Je vhodné srovnat závislost *střední rychlost proudění – napětí* ze série č. 1 se stejnou závislostí vypočtenou ze série č. 2, viz následující text.

Série č. 2 – metoda MKP

Naměřené hodnoty lokálních rychlostí v dílčích průřezech A až H byly přepočteny na průměrnou rychlost pro každý dílčí průřez (viz obrázek 2.20).

$$w_i = \frac{w_{i,\text{směr 1}} + w_{(2n+4-i),\text{směr 1}} + w_{i,\text{směr 2}} + w_{(2n+4-i),\text{směr 2}}}{4} \quad (2.11)$$

kde $w_{i,\text{směr 1}}$ [m/s] je lokální hodnota rychlosti naměřená v i-tém bodě průřezu ve směru 1 (viz obrázek 2.6)

$w_{i,\text{směr 2}}$ [m/s] je lokální hodnota rychlosti naměřená v i-tém bodě průřezu ve směru 2 (viz obrázek 2.6)

Pro každou rychlost v jednotlivých dílčích průřezích byla vypočtena nejistota měření.

Nejistota typu A:

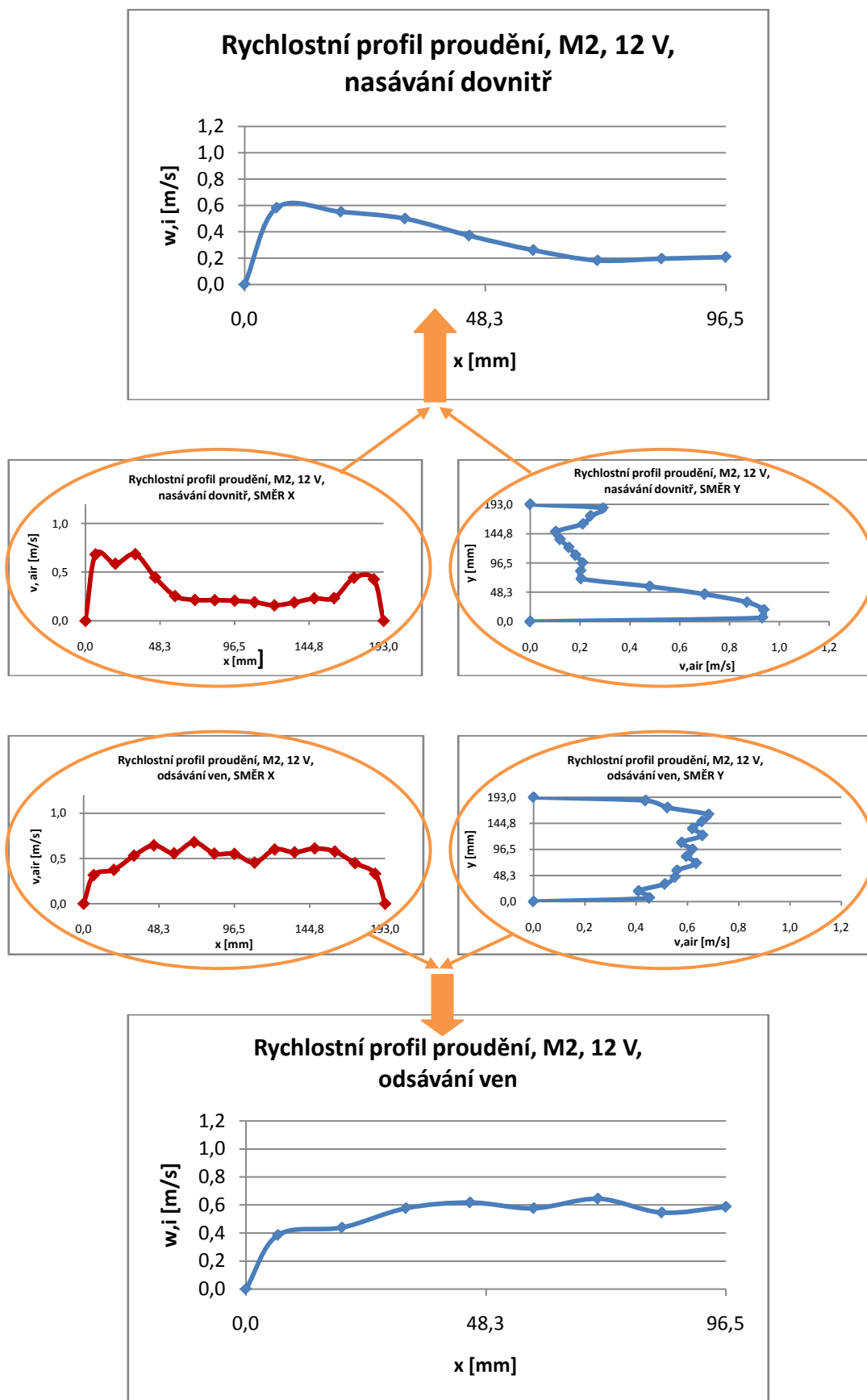
$$U_{A,i} = 1,533 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(w_{i,\text{směr 1}} + w_{(2n+4-i),\text{směr 1}} + w_{i,\text{směr 2}} + w_{(2n+4-i),\text{směr 2}}) - w_i]^2}{n-1}} \quad (2.12)$$

kde $U_{A,i}$ [m/s] je rozšířená nejistota typu A i-tého dílčího průřezu

Koeficient rozšíření nejistoty byl zvolen na základě tabulky 2.7. Interval spolehlivosti byl vybrán $p = 90\%$ a počet měření $n = 4$ (čtyři body, ve kterých byla měřena lokální rychlost proudění).

Tab. 2.7: Koeficienty rozšíření standardní nejistoty typu A [3]

$n \backslash p$	0,90	0,95	0,975	0,99	0,995	0,9975	0,999	0,9995
1	3.078	6.314	12.71	31.82	63.66	127.3	318.3	636.6
2	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	14.09	22.33	31.60
3	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	7.453	10.21	12.92
4	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	5.598	7.173	8.610
5	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	4.773	5.893	6.869
6	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	4.317	5.208	5.959
7	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.029	4.785	5.408
8	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	3.833	4.501	5.041






Obr. 2.20: Přepočet na průměrnou rychlost v dílčích průřezech

Nejistota typu B:

Vzorec pro výpočet nejistoty byl přejat z firemní literatury firmy TESTO. Nejistota typu B pro jednotlivé naměřené dílčí rychlosti proudění je tedy:

$$U_{B,i,\text{směr } 1}; U_{B,i,(2n+4-i),\text{směr } 1}; U_{B,i,\text{směr } 2}; U_{B,i,(2n+4-i),\text{směr } 2} = \pm 0,03 \text{ m/s} + 5 \% \text{ z nam. h.} \quad (2.13)$$

Sondy pro měření proudění	Zobrazení	Měřicí rozsah	Přesnost
Měřicí sonda s vrtulkou, průměr 16 mm, s teleskopem max. 890 mm, např. pro měření v kanále		+0.6 ... +40 m/s	$\pm(0.2 \text{ m/s} + 1.5\% \text{ z nam.h.})$
Měřicí sonda s vrtulkou, průměr 60 mm, s teleskopem max. 910 mm, např. pro měření na výpusti kanálu		+0.25 ... +20 m/s	$\pm(0.1 \text{ m/s} + 1.5\% \text{ z nam.h.})$
Sonda se žhaveným drátkem pro m/s a °C, Ø špičky sondy 7,5 mm, vč. teleskopu (max. 820 mm)		0 ... +20 m/s	$\pm(0.03 \text{ m/s} + 5\% \text{ z nam.h.})$

Obr. 2.21: Technické parametry kombinované měřicí sondy TESTO [4]

$$U_{B,i} = \sqrt{U_{B,i,\text{směr } 1}^2 + U_{B,i,(2n+4-i),\text{směr } 1}^2 + U_{B,i,\text{směr } 2}^2 + U_{B,i,(2n+4-i),\text{směr } 2}^2} \quad (2.14)$$

kde $U_{B,i}$ [m/s] je nejistota typu B i-tého dílčího průřezu

Kombinovaná nejistota:

$$U_{C,i} = \sqrt{U_{A,i}^2 + U_{B,i}^2} \quad (2.15)$$

kde $U_{C,i}$ [m/s] je kombinovaná nejistota i-tého dílčího průřezu

Poznámka 2.7: Označení kombinované nejistoty měření v dalším textu

V dalším textu bude kombinovaná nejistota jednotlivých dílčích průřezů $U_{C,i}$ označována symbolem „s“, v grafech jako „NEJISTOTA“.

$$s = U_{C,i} \quad (2.16)$$

Celkový průtok potrubím:

$$V_{i,12,0 \text{ V}} = w_{i,12,0 \text{ V}} \cdot S_{i,12,0 \text{ V}} \quad i = (A, \dots, H) \quad (2.17)$$

kde $V_{i,12,0 \text{ V}}$ [m³/s] je objemový průtok i-tým průřezem potrubí při napětí 12,0 V
 $w_{i,12,0 \text{ V}}$ [m/s] je střední rychlost proudění i-tým průřezem potrubí při napětí 12,0 V
 $S_{i,12,0 \text{ V}}$ [m²] je průřez i-tého měřicího průřezu potrubí

$$S_{i,12,0 \text{ V}} = \pi(r_{i+1} - r_i)^2 \quad (2.18)$$

Objemový průtok jednotkou při napětí 12,0 V:

$$V_{12,0 \text{ V}} = \sum_{i=A}^H V_{i,12,0 \text{ V}} \quad (2.18)$$

Střední rychlost proudění vzduchu v potrubí:

$$w_{\text{stř},12,0 \text{ V}} = \frac{V_{12,0 \text{ V}}}{S} \quad (2.19)$$

Při dalším výpočtu bylo postupováno stejně jako série č. 1.

Faktor profilu PF (rovnice 2.8):

$$PF = \frac{w_{\text{stř},12,0 \text{ V}}}{w_{\text{osa},12,0 \text{ V}}}$$

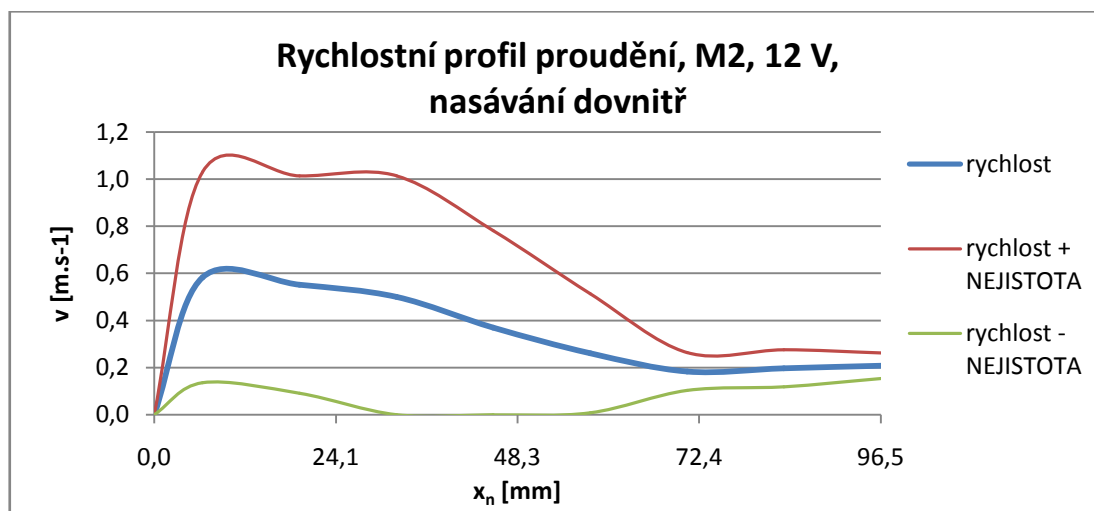
Střední hodnota rychlosti při napětí sníženém na 10,5 V (rovnice 2.9):

$$w_{\text{stř},10,5 \text{ V}} = PF \cdot w_{\text{osa},10,5 \text{ V}}$$

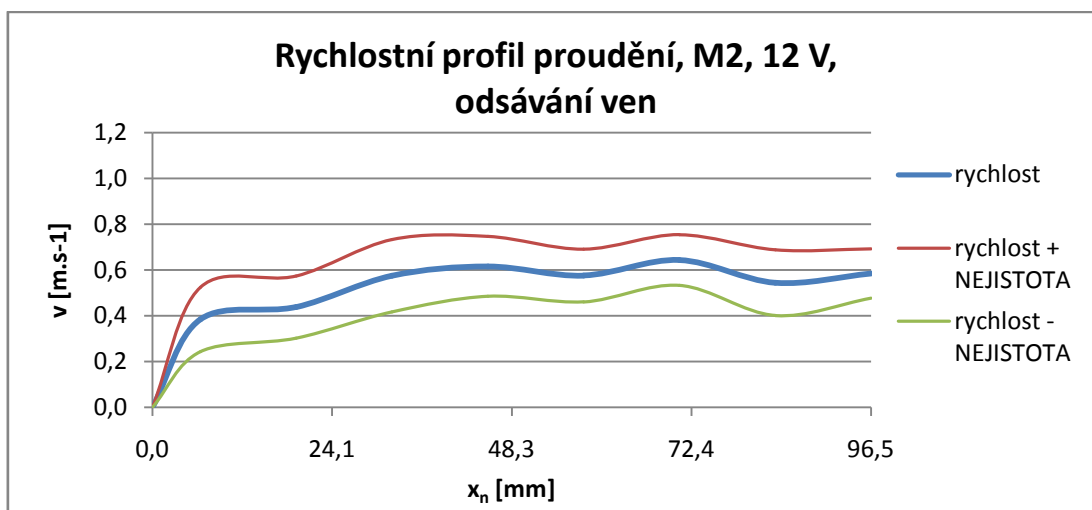
Střední hodnota rychlosti při napětí sníženém na 7,2 V (rovnice 2.10):

$$w_{\text{stř},7,2 \text{ V}} = PF \cdot w_{\text{osa},7,2 \text{ V}}$$

Vypočtené hodnoty nejistot jsou graficky znázorněny na obrázcích 2.22 a 2.23. Při nasávání studeného venkovního vzduchu dovnitř místnosti je rychlostní profil v měřicím potrubí značně nerovnoměrný (viz obr. 2.14 a zejména obr. 2.15). Velká nerovnoměrnost profilu způsobuje velké hodnoty nejistot. V dalších částech práce byly brány v potaz pouze střední hodnoty rychlostních profilů resp. rychlostí proudění vzduchu.



Obr. 2.22: Rychlostní profil proudění včetně nejistot měření, nasávání dovnitř, série měření č. 2



Obr. 2.23: Rychlostní profil proudění včetně nejistot měření, odsávání ven, série měření č. 2

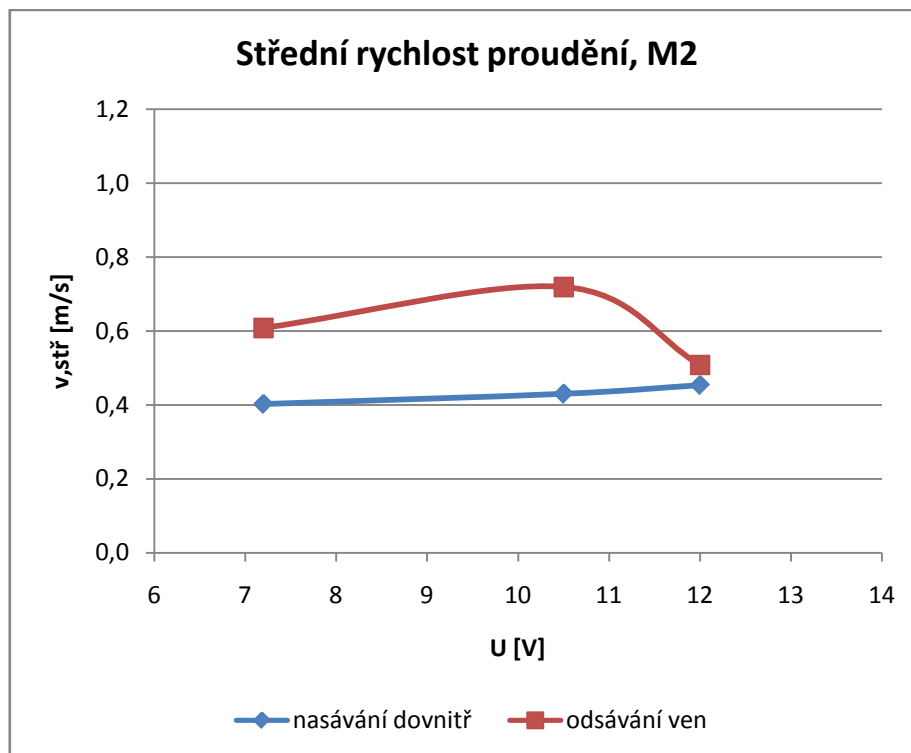
Výpočet středních hodnot rychlostí proudění byl proveden pomocí faktoru profilu PF, obdobně jako u série měření č. 1 (viz rovnice č. 2.8 až 2.10). Při variantě nasávání vzduchu dovnitř klesala rychlost proudění úměrně snižování napětí na ventilátorech (viz obrázek 2.24 a viz tabulka 2.8). Na základě tohoto zjištění lze výpočet považovat kvalitativně za správný. Při variantě odsávání má střední rychlost proud trend zcela opačný, proto výsledky nelze kvalitativně považovat za správné. Výše uvedenou nepřesnost měření lze přisoudit nedostatečné délce měřicího potrubí, kdy proudění v místě měření není ustálené, viz poznámka 2.1.

Tab. 2.8: Číselné hodnoty rychlostí proudění vzduchu, série měření č. 2

střední hodnota			
směr proudění		DOVNITŘ	
napětí na ventilátoru	rychlost v ose proudu	střední rychlost proudu	faktoru profilu
U	w,n	w,str	PF
V	m/s	m/s	-
12.0	0.21	0.45	2.18
10.5	0.20	0.43	2.18
7.2	0.19	0.40	2.18

střední hodnota			
směr proudění		VEN	
napětí na ventilátoru	rychlost v ose proudu	střední rychlost proudu	faktoru profilu
U	w,n	w,str	PF
V	m/s	m/s	-
12.0	0.59	0.51	0.87
10.5	0.83	0.72	0.87
7.2	0.70	0.61	0.87

Hodnoty rychlostí pro snížená napětí by bylo třeba znova proměřit metodikou použitou při sérii měření č. 2 pro napětí 12,0 V. To znamená proměřit rychlostní profil v celém průřezu.



Obr. 2.24: Střední rychlost proudění vzduchu přes jednotku v závislosti na napětí, série měření č. 2

Poznámka 2.8: Rozdílné hodnoty rychlostí pro nasávání a odsávání vzduchu

Z tabulek 2.6 a 2.8 lze vysledovat fakt, že při odsávání vzduchu ven z místnosti je rychlost proudění vzduchu přes jednotku pro všechny úrovně napětí vždy vyšší než při nasávání vzduchu dovnitř. Tento fakt je pravděpodobně způsoben přirozeným vztlakem vzduchu v budově, kdy je vzduch v horních patrech budovy vytlačován do venkovního prostředí. Vliv tohoto jevu byl v dalším postupu práce respektován.

Pro výpočet účinností ZZT regeneračního výměníku bylo třeba stanovit hodnoty středních rychlostí proudění a následně průtoků vzduchu alespoň přibližně. Hodnoty k úpravě byly zvoleny ze série měření č. 2, které byly na základě poznatků ze série měření č. 1 upraveny. V dalším textu práce byly použity právě tyto upravené hodnoty. Přesný způsob úpravy je uveden v následujícím textu:

1. Výpočet poměrných velikostí středních rychlostí při sníženém napětí vzhledem k velikosti střední rychlosti při plném napětí $U = 12,0V$

Jednotlivé poměry jsou tabelovány v tabulce č. 2.9.

střední hodnota			střední hodnota		
sm. proudění	DOVNITŘ		sm. proudění	VEN	
napětí na ventilátoru	střední rychlost proudu	poměr. velikost k $w_{stř, 12,0V}$	napětí na ventilátoru	střední rychlost proudu	poměr. velikost k $w_{stř, 12,0V}$
U	w, stř	P	U	w, stř	P
V	m/s	%	V	m/s	%
12.0	0.51	100.0	12.0	0.57	100.0
10.5	0.48	94.7	10.5	0.49	86.3
7.2	0.37	73.7	7.2	0.41	73.1

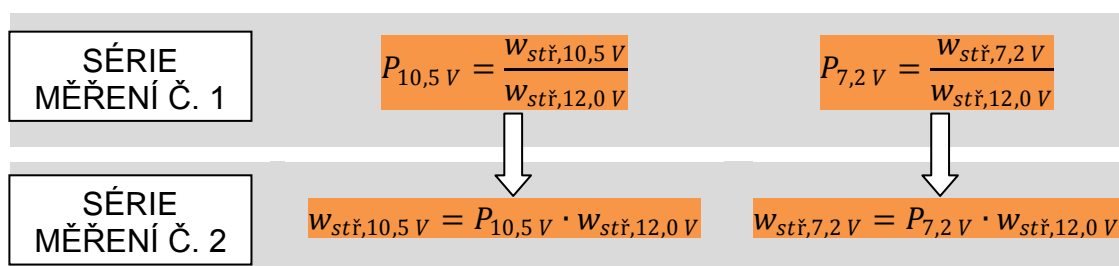
Tab. 2.9: Poměrné velikosti středních rychlostí proudu, série měření č. 1

2. Poměrné velikosti rychlostí v sérii měření č. 2 byly nahrazeny poměrnými velikostmi rychlostí ze série měření č. 1

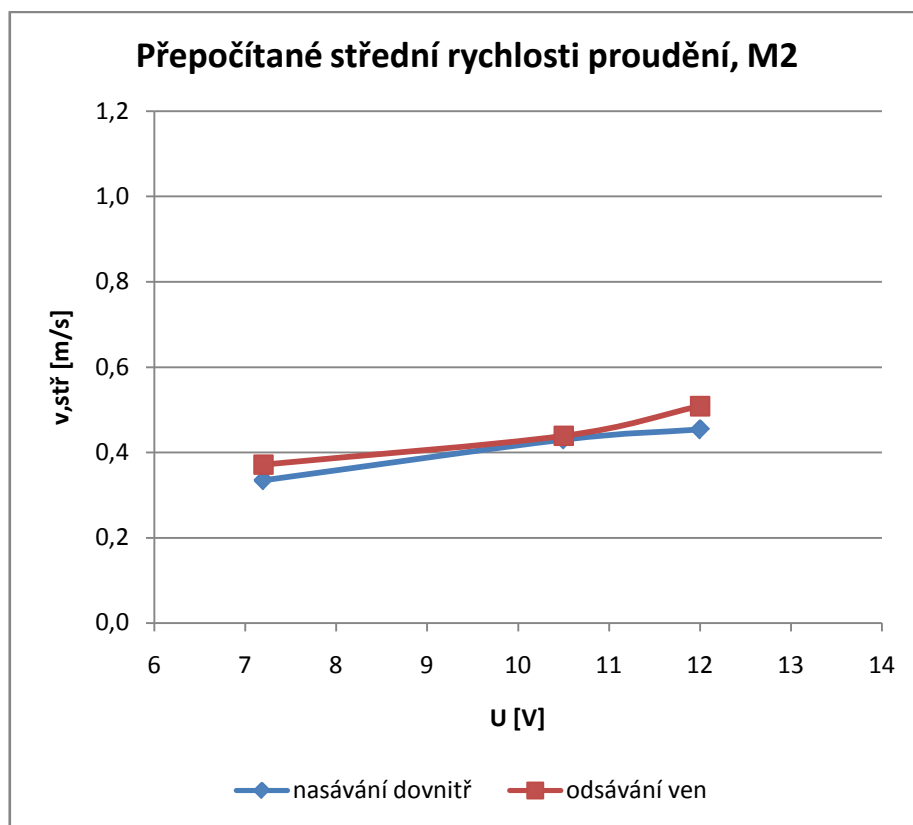
střední hodnota			střední hodnota		
sm. proudění	DOVNITŘ (VYB)		sm. proudění	VEN (NAB)	
napětí na ventilátoru	střední rychlost proudu	poměr. velikost k $w_{stř, 12,0V}$	napětí na ventilátoru	střední rychlost proudu	poměr. velikost k $w_{stř, 12,0V}$
U	w, stř	P	U	w, stř	P
V	m/s	%	V	m/s	%
12.0	0.45	100.0	12.0	0.51	100.0
10.5	0.43	94.7	10.5	0.44	86.3
7.2	0.33	73.7	7.2	0.37	73.1

Tab. 2.10: Přepočtené velikosti středních rychlostí proudu, série měření č. 2

Princip výpočtu je graficky znázorněn na obrázku č. 2.25:



Obr. 2.25: Princip přepočtu poměrných rychlostí



Obr. 2.26: Přepočítané střední rychlosti proudění, M2

Velikosti průtoků vzduchu

Velikosti průtoků jednotkou byly stanoveny na základě rychlostí proudění vzduchu ze série měření č. 2 a to pouze pro napětí na ventilátorech 12 V. Pro ostatní hodnoty napětí počítány nebyly.

V tabulce č. 2.11 byly přepočítány hodnoty středních rychlostí v měřicím potrubí na hodnoty středních rychlostí proudění v kanálcích výměníku. K přepočtu bylo přistoupeno z důvodu rozdílných průtočných průřezů měřicího potrubí a výměníku. Při přepočtu bylo využito rovnice kontinuity.

Tab. 2.11: Výpočet rychlostí proudění a objemového průtoku vzduchu jednotkou

kruhové potrubí				
průměr	D	mm	193	
plocha	S	mm ²	29 255.3	

výměník				
délka strany vstupního úseku	a,vst	mm	4.312	
délka strany kanálu	a,kan	mm	3.712	
průtočný průřez vstup. úseku	S,vst,1k	mm ²	18.593	
průtočný průřez 1 kanálu	S,průt,1k	mm ²	13.779	
počet kanálů	k	-	625	
celk. průtoč. plocha vst. úseku	S,vst,celk	mm ²	11 620.8	
celk. průtoč. plocha kanálů	S,kan,celk	mm ²	8 611.8	

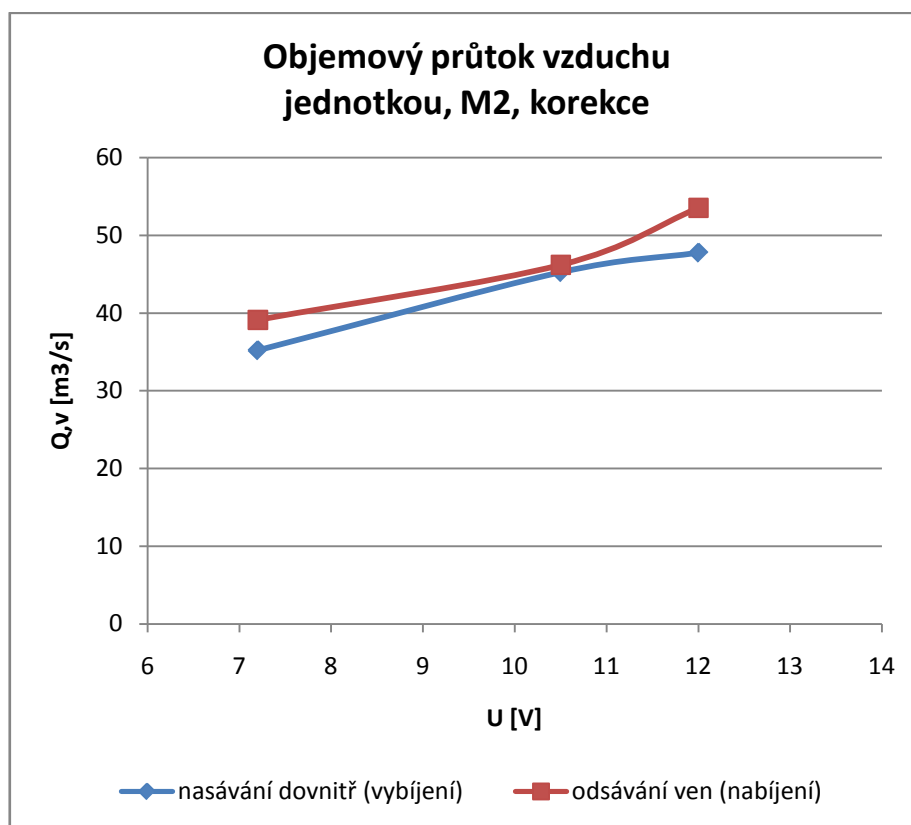
přepočet rychlosti trubka → kanálek				
(dle rovnice kontinuity)	$Q = S * v_{stř, 12V} = S_{vym} * v_{vym}$			
			VYB	NAB
rychlost proudění v trubce	$v_{stř, 12, 0V}$	m.s-1	0.45	0.51
rychl. proudění ve vst. úseku	$v_{vst, 12, 0V}$	m.s-1	1.14	1.28
rychlost proudění v kanálu	$v_{1k, 12, 0V}$	m.s-1	1.54	1.73
rychlost proudění v trubce	$v_{stř, 10, 5V}$	m.s-1	0.43	0.44
rychlost proudění v trubce	$v_{stř, 7, 2V}$	m.s-1	0.33	0.37

objemový průtok vzduchu jednotkou				
(dle rovnice kontinuity)	$Q = S * v_{stř, 12, 0V}$		VYB	NAB
	$Q_{v, 12, 0V}$	m ³ /s	0.01327	0.01488
	$Q_{v, 12, 0V}$	m ³ /hod	47.8	53.6
(dle rovnice kontinuity)	$Q = S * v_{stř, 10, 5V}$		VYB	NAB
	$Q_{v, 10, 5V}$	m ³ /s	0.01258	0.01284
	$Q_{v, 10, 5V}$	m ³ /hod	45.3	46.2
(dle rovnice kontinuity)	$Q = S * v_{stř, 7, 2V}$		VYB	NAB
	$Q_{v, 7, 2V}$	m ³ /s	0.00978	0.01087
	$Q_{v, 7, 2V}$	m ³ /hod	35.2	39.1

Poznámka 2.9: Vysvětlivky k tabulce č. 2.11

Buňky vybarvené bílou barvou obsahují vstupní hodnoty, buňky označené šedou barvou obsahují vypočtené hodnoty a buňky označené oranžovou barvou obsahují výsledné hodnoty, které budou použity dále v práci.

Výsledné hodnoty objemových průtoků vzduchu jednotkou jsou uvedeny na obrázku č. 2.27. Vysvětlení navzájem se lišících velikostí průtoků vzduchu při nasávání a při odsávání je podáno v poznámce č. 2.8. Poznámka č. 2.8 podává vysvětlení pro rozdílné rychlosti proudění, totéž platí pro objemové průtoky, neboť výpočet objemových průtoků vychází právě z rychlostí proudění, viz tabulka č. 2.11.

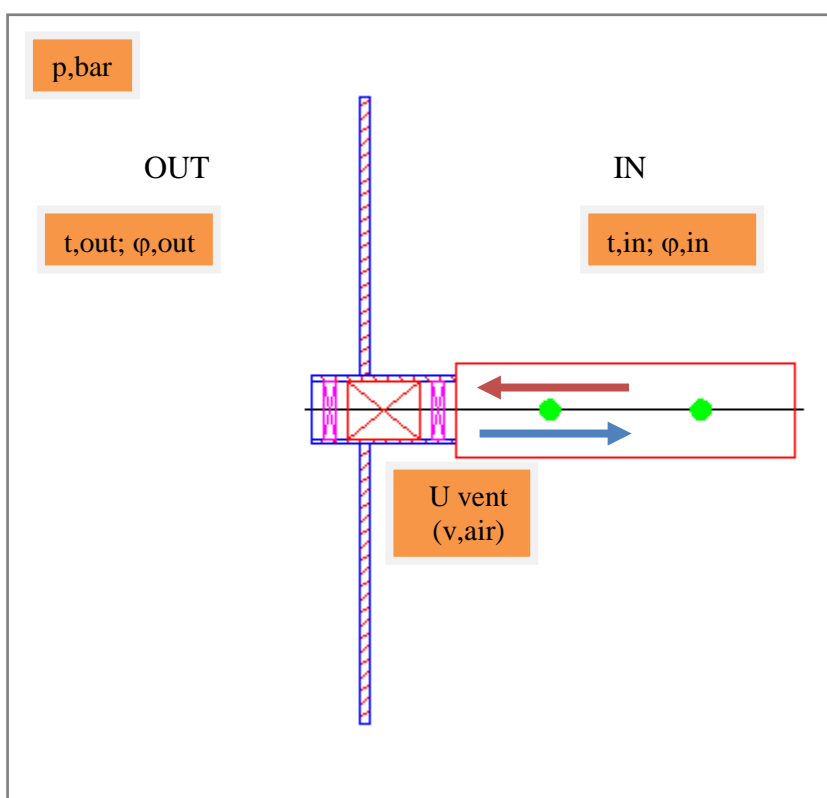


Obr. 2.27: Přepočítaný objemový průtok vzduchu jednotkou, M2

2.4.2 Křivky cyklického nabíjení a vybíjení

Kapitola se zabývá vlivem změny provozních podmínek jednotky na účinnost zpětně získávaného tepla. Proměnnými provozními podmínkami byly teplota a vlhkost vnitřního a venkovního vzduchu, svorkové napětí na ventilátorech (objemový průtok vzduchu jednotkou), barometrický tlak vzduchu a perioda přepínání ventilátorů (perioda změny směru toku vzduchu přes jednotku). Principem funkce jednotky se zabývá kapitola č. 5. (Jediným rozdílem oproti kapitole č. 5 je proměnná délka periody přepínání ventilátorů.)

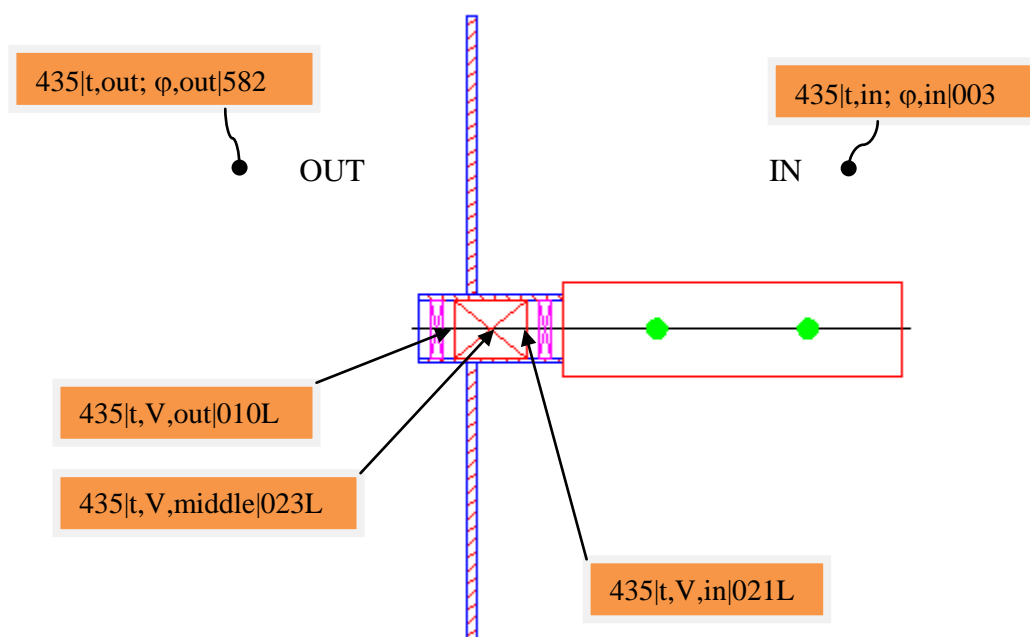
Při měření jednotlivých provozních scénářů byly naměřeny průběhy teplot na obou koncích a uprostřed výměníku. Data byla vyhodnocena jednak graficky pro vytvoření přehledu o časovém průběhu jednotlivých veličin a odhalení případných dalších jevů, jako např. kondenzace vlhkosti ve výměníku. Dále byla data vyhodnocována početně, z početního vyhodnocení byla stanovena účinnost ZZT systému pro jednotlivé provozní scénáře.



Obr. 2.28: Měřené proměnné provozní podmínky jednotky

Metodika měření

Měřicí přístroje byly rozmístěny dle obrázku č. 2.29. Venkovní kombinovaná sonda č. 582 byla umístěna z venkovní strany za okno a odstíněna od radiace, vnitřní kombinovaná sonda č. 003 byla umístěna ve vnitřním prostředí, viz obrázek č. 6.30. Sonden pro měření teplot vzduchu č. 010L a 021L byly umístěny na venkovní resp. vnitřní okraj výměníku. Sonda 023L byla umístěna doprostřed délky výměníku do prostředního kanálu. Sondu bylo možno zavést doprostřed výměníku až po zhotovení otvoru do výměníku.



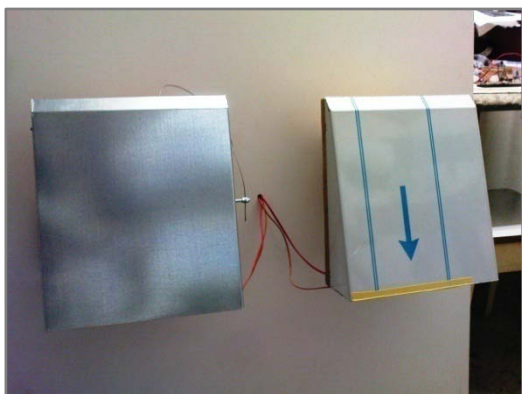
Obr. 2.29: Schéma měřených veličin

Poznámka 2.10: Zhotovení otvoru do výměníku

Pro měření teploty uprostřed délky a zároveň uprostřed příčného průřezu výměníku bylo nutno zhotovit do výměníku otvor. Výměník je vyroben z keramického materiálu, vyznačujícího se svou vysokou tvrdostí. Vysoká tvrdost materiálu omezovala výběr vhodných technologií pro zhotovení otvoru. V úvahu proto přicházelo řezání pomocí vodního paprsku nebo klasické vrtání pomocí vidiového vrtáku určeného pro vrtání zdiva. Řezání vodním paprskem má jednu velkou nevýhodu pro danou aplikaci – výměník by byl prořezán přes celý svůj průřez a ne jen do jeho poloviny, což by vedlo k většímu ovlivnění měření (vliv otvoru na proudění uvnitř kanálů). Otvor byl tedy vyvrtán pomocí vidiového vrtáku na sloupové vrtačce při nastavených velmi nízkých otáčkách vřeten a to přesně do poloviny příčného průřezu výměníku.

Následující obrázky ukazují průběh instalace a konečné umístění měřicích sond na reálné měřicí sestavě.

Do dřevotřískové desky, prozatím volně uložené v místnosti, byly před výměník resp. hliníkovou voštinu vsazeny ventilátory. Otvory na okrajích ventilátorů byly protaženy kabely teplotních sond. Po seřízení sond do správné polohy byly veškeré otvory, kterými by mohl pronikat vzduchu mimo ventilátor, utěsněny silikonovým tmelem. Dále byla do sestavy nainstalována sonda pro měření teploty uprostřed výměníku. Na závěr došlo k zakrytí otvorů venkovním krytem. Kryt byl po svém obvodu (kromě spodní strany) rovněž utěsněn tmelem. Na obrázku č. 2.30 je vidět, že kabeláž vede i k sondě do otvoru vyplněného hliníkovou voštinou (měření teplot na hliníkové voštině bylo pouze orientační a data nebyla dále nijak vyhodnocována). Dále byla celá deska s měřicí sestavou vsazena do okenního rámu.

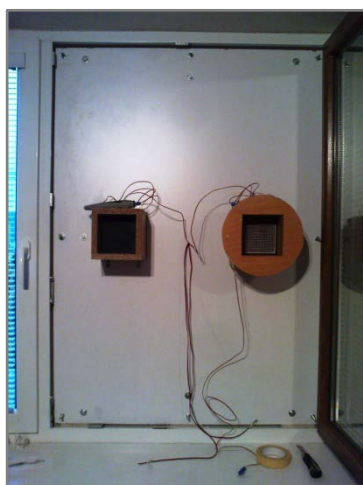


Obr. 2.30: Kabeláž k venkovním měřicím sondám



Obr. 2.31: Umístění sestavy v rámu okna v 2. NP

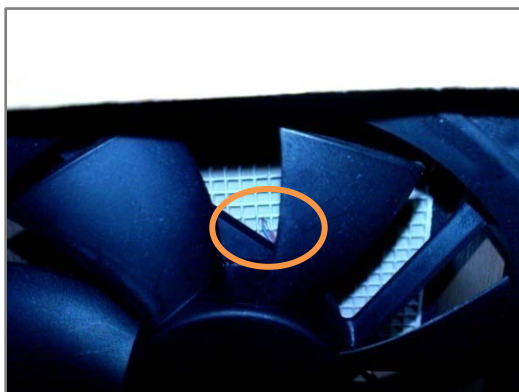
Na obrázku 2.32 lze vidět v otvoru na pravé straně vsazený tepelný výměník. Hliníková voština byla vsazena do levého otvoru. Po uchycení dřevotřískové desky do okenního rámu byly obdobně jako u venkovní strany do otvorů vsazeny ventilátory a osazeny teplotní sondy (jedna na stranu výměníku, druhá na stranu hliníkové voštiny).



Obr. 2.32: Pohled na měřicí sestavu zevnitř



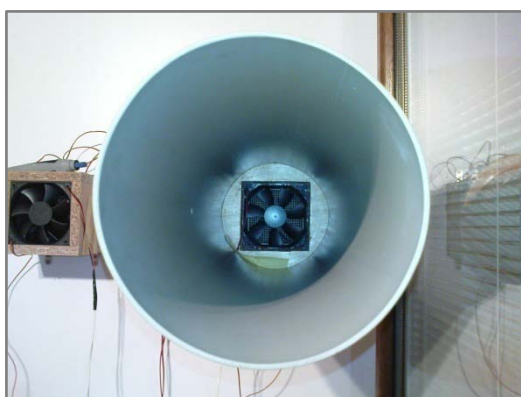
Obr. 2.33: Vnitřní strana výměníku osazená ventilátorem a teplotní sondou



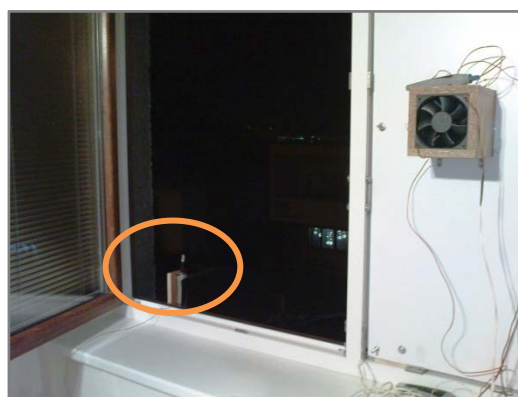
Obr. 2.34: Detail umístění teplotní sondy na vnitřní straně výměníku



Obr. 2.35: Umístění vnitřní kombinované sondy



Obr. 2.36: Detail přechodu měřicí potrubí - ventilátor



Obr. 2.37: Umístění venkovní kombinované sondy

Na závěr bylo na čelo otvoru s výměníkem umístěno potrubí pro měření rychlosti proudění.

Systém a průběh zaznamenávání dat byl objasněn v obrázku 2.2 a v kapitole 2.3.

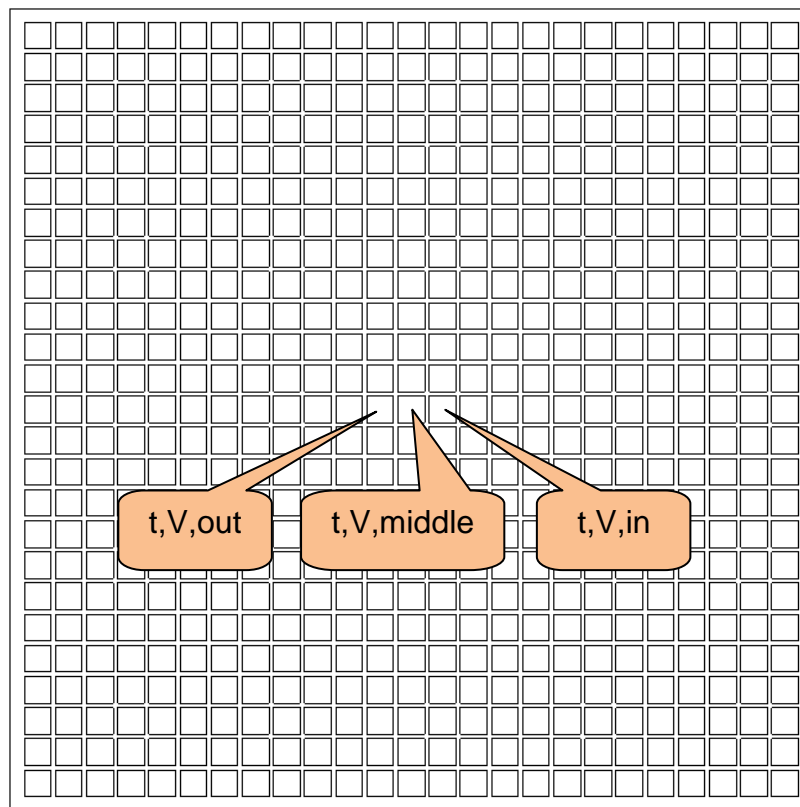
Poznámka 2.11: Zdůvodnění instalace potrubí pro měření rychlosti při měření křivek cyklického nabíjení a vybíjení výměníku

Při měření cyklického nabíjení a vybíjení výměníku bylo instalováno potrubí pro měření rychlosti proudění i přesto, že rychlosti proudění nebylo třeba měřit (byly naměřeny v jiné části práce). Potrubí muselo být instalováno z důvodu zachování stejného celkového hydraulického odporu sestavy vůči proudění vzduchu tak aby mohly být při vyhodnocování dat použity hodnoty rychlostí proudění resp. objemových průtoků vzduchu z kapitoly 2.4.1 Rychlosti proudění – průtoky vzduchu.

Celkový pohled na měřicí sestavu je vyobrazen v příloze č. 2.

Poznámka 2.12: Umístění sond v kanálech výměníku

Pro měření byl zvolen kanál uprostřed průřezu výměníku z důvodu zajištění symetrických podmínek měření. V tomto kanálu by však docházelo k velké tlakové ztrátě při proudění vzduchu vlivem geometrie měřicích sond a následnému velkému ovlivnění měření. Bylo přistoupeno ke kompromisnímu řešení, kdy každá jedna sonda byla umístěna do samostatného kanálu. Sonda pro měření teploty uprostřed výměníku byla ponechána v prostředním kanálu, ostatní dvě sondy byly umístěny po jedné symetricky na každou stranu od středového kanálu. Vzhledem k počtu kanálů v průřezu lze umístění sond mimo středový kanál zanedbat.



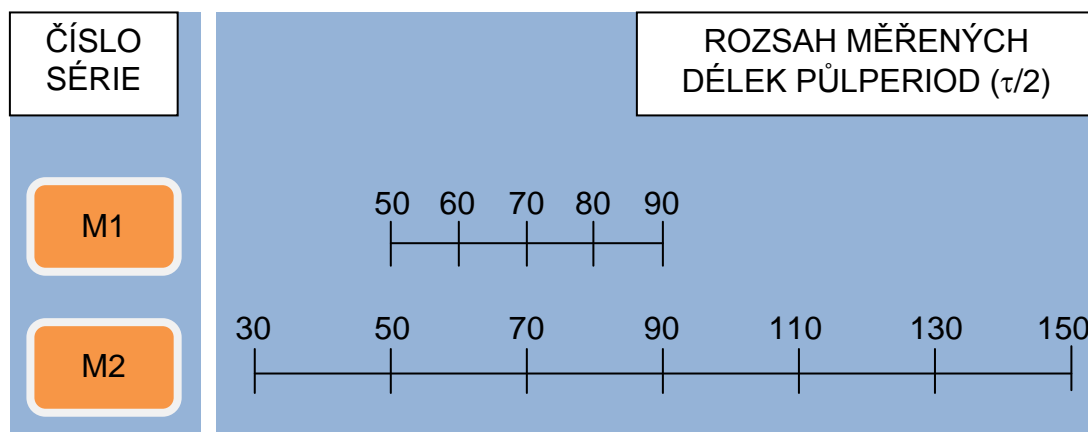
Obr. 2.38: Čelní pohled na výměník, umístění měřicích sond v kanálech výměníku

Poznámka 2.13: Měření barometrického tlaku

Barometrický tlak nebyl měřen v místě měření (Zlín), ale byl odečítán z webových stránek Českého hydrometeorologického ústavu a to data z meteorologické stanice v Holešově [5]. Město Holešov je vzdáleno od města Zlín (místo měření) cca 15 km vzdušnou čarou. Barometrický tlak se s nadmořskou výškou mění. Změna se projevuje poklesem tlaku při rostoucí nadmořské výšce. Meteorologická stanice Holešov uvádí barometrický tlak přepočtený na hladinu moře, což umožňuje tento tlak přepočítat na nadmořskou výšku místa měření (viz rovnice 2.28).

Naměřená data

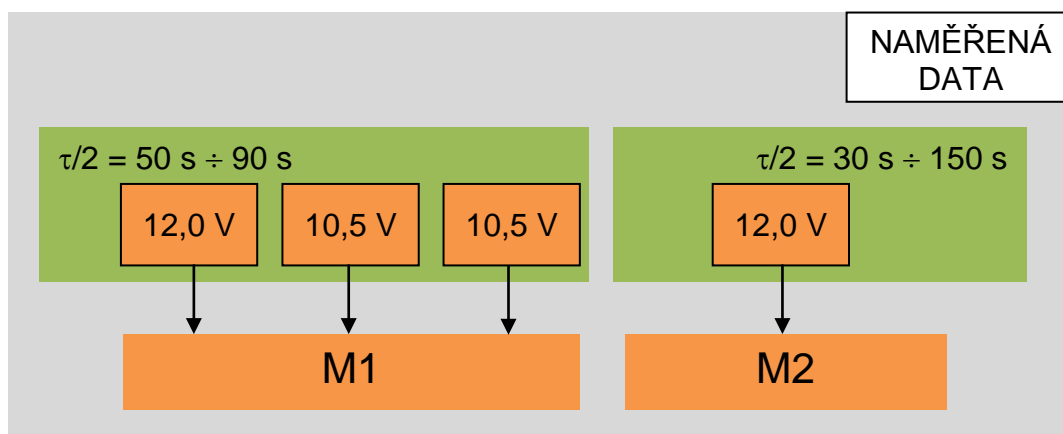
Měření sestávalo ze dvou sérií měření, jednotlivá časová období, ve kterých měření probíhala, jsou uvedena v tabulce 2.1. V sérii měření č. 1 byl celkový rozsah užší, ovšem odstupňování jednotlivých délek period bylo jemnější než u série měření č. 2.



Obr. 2.39: Rozsah měřených délek půlperiod

V sérii měření č. 1 byla naměřena data pro jednotlivé délky period při plném napětí na ventilátorech 12,0 V i při sníženém napětí 10,5 V a 7,2 V. K měření sníženého napětí bylo přistoupeno na základě úspěšného výpočtu rychlostí proudění při jednotlivých úrovních napětí.

V sérii č. 2 byla naměřena data pouze pro úroveň napětí 12,0 V, neboť pro snížené napětí došlo k chybné metodice měření rychlostí proudění (viz kapitola 2.4.1). Vypočítané hodnoty rychlostí byly pak velmi vzdálené skutečným hodnotám rychlostí a měření charakteristik výměníku pro tyto hodnoty by nemělo smysl. Nesprávné hodnoty rychlostí uvádí tabulka 2.8 vpravo.



Obr. 2.40: Schéma naměřených dat pro cyklické nabíjení a vybíjení

kde M1 je symbol pro sérii měření č. 1
M2 je symbol pro sérii měření č. 2

Křivky cyklického nabíjení a vybíjení výměníku

Na základě měření teplot na vnější, vnitřní straně a uprostřed výměníku, dále v interiéru místnosti a ve venkovním prostředí byly vytvořeny křivky cyklického nabíjení a vybíjení výměníku.

Poznámka 2.14: Terminologie – perioda a půlperioda

Perioda přepnutí (dále označována symbolem τ) = doba, po kterou proběhne jedno nabití a jedno vybíjení výměníku, dále v textu označována pouze jako perioda).

Půlperioda přepnutí (dále označována symbolem $\tau/2$) = doba, po kterou proběhne jedno nabití nebo jedno vybíjení výměníku, dále v textu označována jako půlperioda.

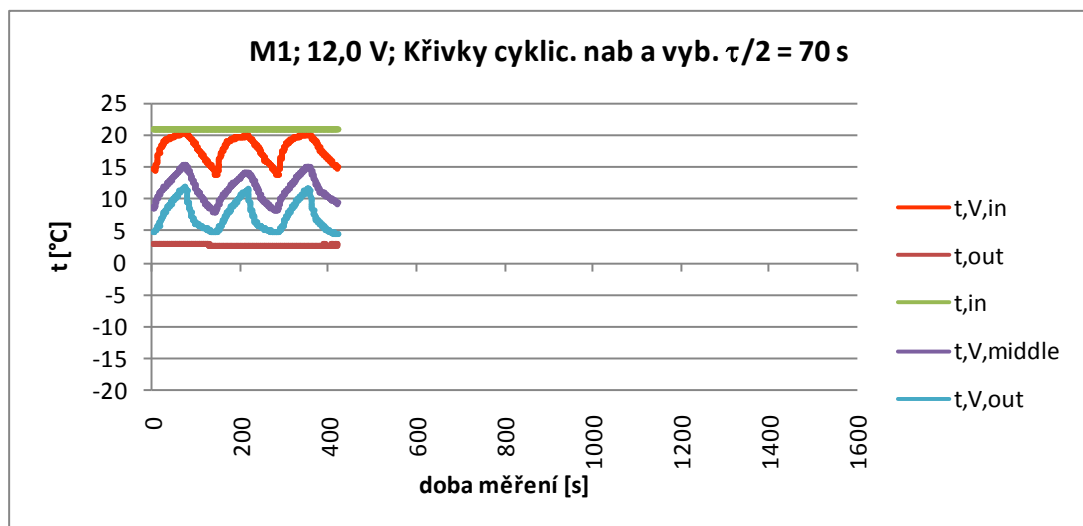
První půlperioda představuje dobu nabíjení výměníku a je dále v textu označována intervalem $(0; \tau/2)$, druhá půlperioda představuje dobu vybíjení výměníku a je označována intervalem $(\tau/2; \tau)$.

Při započetí každého měření bylo vždy nutno nechat systém ustálit. Ustálení spočívalo v odeznění přechodového jevu, kdy byla průměrná teplota výměníku po dobu periody jiná, nežli teplota po dostatečně dlouhém počtu period. Prakticky bylo odeznění jevu realizováno záznamem dat po celou dobu měření, tzn. od začátku až do konce, a při vyhodnocování dat nebyly následně brány v potaz data z prvních třech period.

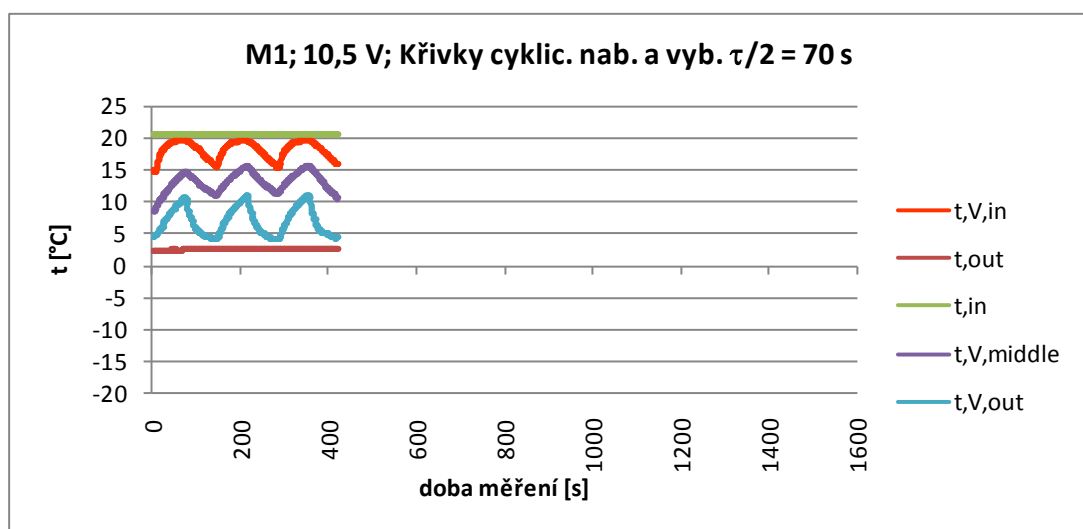
Z obrázků č. 2.41 až 2.43 je patrné, že pro daný scénář měření (viz nadpisy jednotlivých obrázků) jsou vyobrazeny tři periody. Při zpracovávání dat byly další tři periody (tzn. první tři periody) vynechány. Celkem bylo naměřeno 6 period. Vynechání prvních třech period bylo aplikováno i při výpočtu účinnosti, viz další text.

V sérii měření č. 1 bylo naměřeno pro každý provozní scénář (jinak řečeno: pro každý jeden graf) celkem pět až šest period přepnutí.

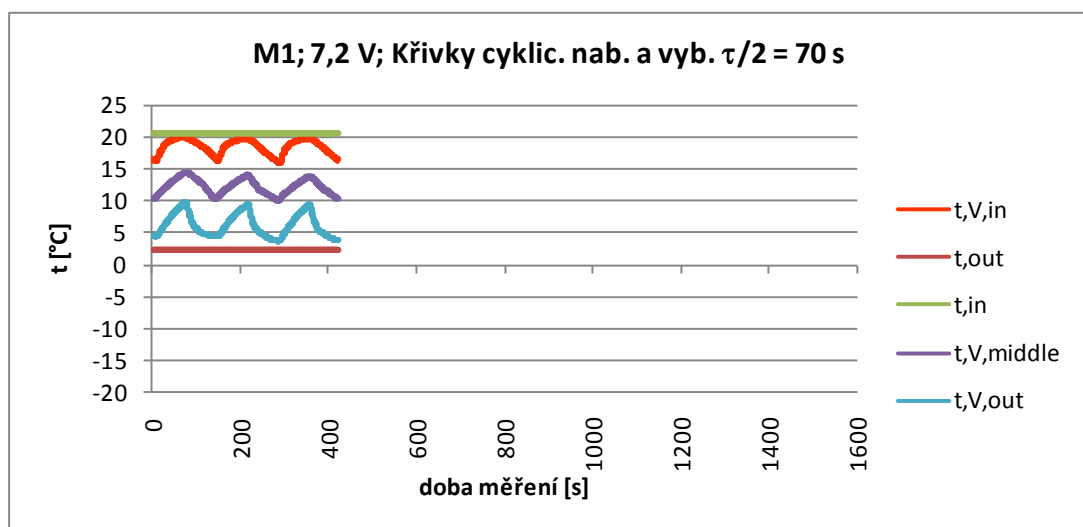
V sérii měření č. 2 byl počet měřených period pro všechna měření sjednocen na osm. První tři periody byly opět vynechány a z posledních pěti period byly vytvořeny křivky cyklického nabíjení a vybíjení (viz obrázek 2.44 a 2.46) a dále vypočtena účinnost výměníku.



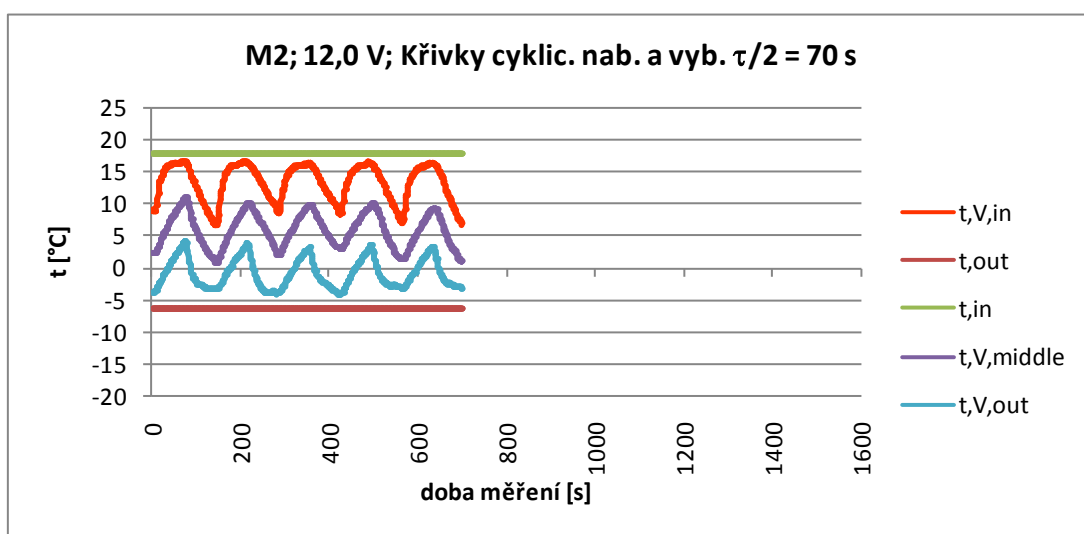
Obr. 2.41: Křivky cyklického nabíjení a vybíjení výměníku, M1, 12,0V, $\tau/2 = 70$ s



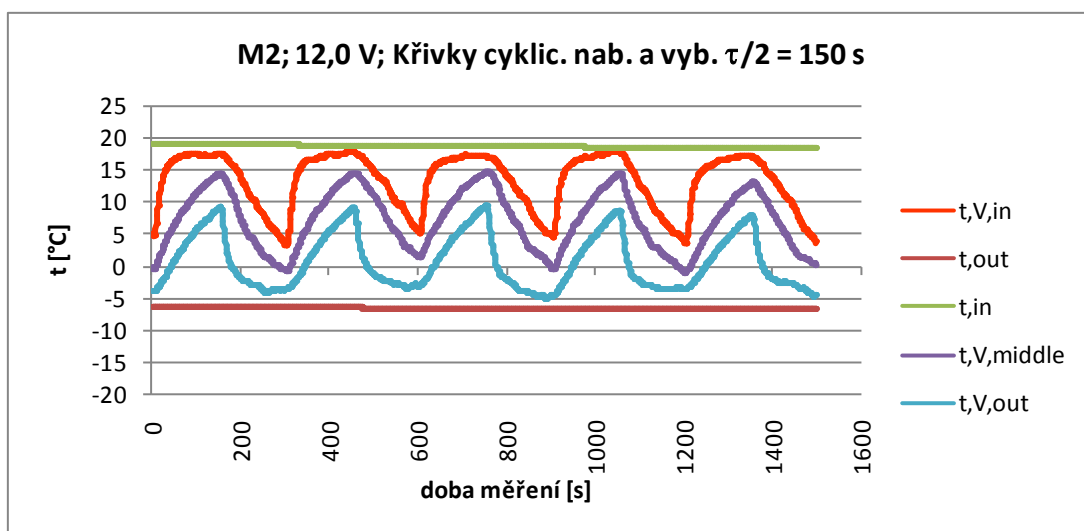
Obr. 2.42: Křivky cyklického nabíjení a vybíjení výměníku, M1, 10,5V, $\tau/2 = 70$ s



Obr. 2.43: Křivky cyklického nabíjení a vybíjení výměníku, M1, 7,2 V, $\tau/2 = 70$ s

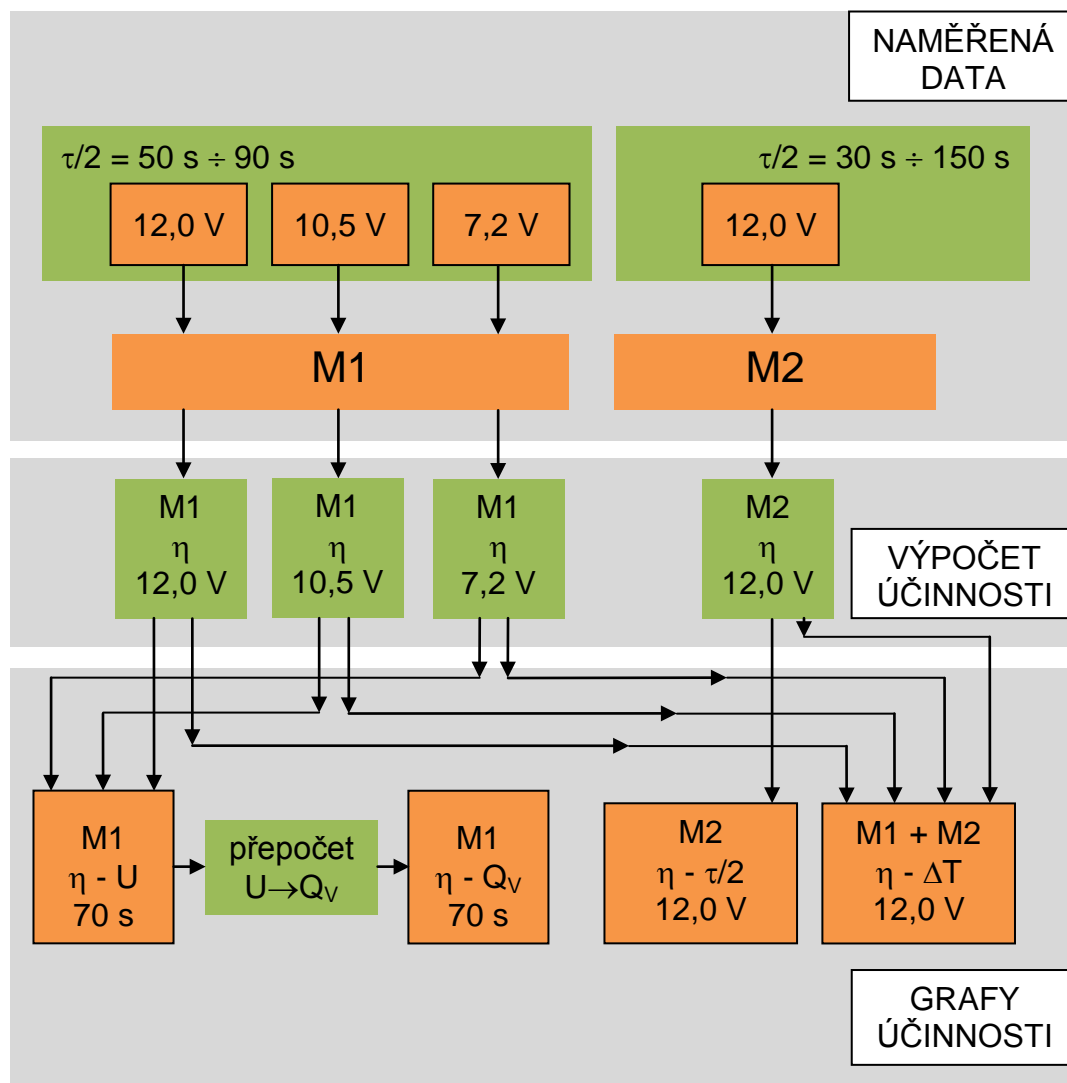


Obr. 2.44: Křivky cyklického nabíjení a vybíjení výměníku, M2, 12,0 V, $\tau/2 = 70$ s



Obr. 2.45: Křivky cyklického nabíjení a vybíjení výměníku, M2, 12,0 V, $\tau/2 = 150$ s

Vyhodnocení dat



Obr. 2.46: Schéma vyhodnocení dat při měření cyklických křivek nabíjení a vybíjení

kde	η [-]	je účinnost ZZT regeneračního výměníku
	U [V]	je napětí na svorkách ventilátorů
	Q_v [m ³ /h]	je objemový průtok vzduchu jednotkou
	$\tau/2$ [s]	je délka půlperiody, viz poznámka č. 2.14
	ΔT [°C]	je rozdíl teplot mezi vnějším a vnitřním prostředím

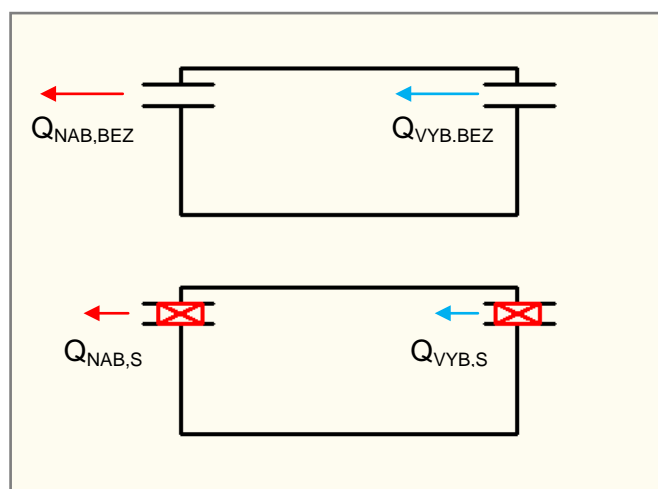
Při vyhodnocování dat bylo postupováno dle schématu na obrázku č. 2.46. Z naměřených dat byly vypočítány účinnosti ZZT regenerační jednotky. Z vypočítaných hodnot účinností byly sestaveny grafy účinností v závislosti na několika různých parametrech.

Postup výpočtu účinnosti

Princip stanovení účinnosti ZZT výměníku je založen na výpočtu tepelných bilancí. Základem výpočtu bylo stanovení tepelných toků ve větracím otvoru a to pro dva případy.

Prvním případem byl větrací otvor, ve kterém nebyl výměník umístěn, tzn. prázdný otvor. Příklad sloužil k výpočtu maximální hodnoty tepla, které by přes jednotku uniklo do venkovního prostředí (resp. vniklo z venkovního prostředí do místnosti – viz obrázek 2.47 a viz rovnice 2.23 a 2.25), jestliže by výměník měl účinnost 0%.

Druhým případem byl větrací otvor s výměníkem, tzn. kompletní měřená jednotka. Příklad sloužil k výpočtu hodnoty tepla, které přes jednotku uniklo ven (při odsávání vzduchu z místnosti) resp. k výpočtu hodnoty chladu (= hodnoty tepla se záporným znaménkem), který snižoval objem tepla v místnosti, viz rovnice 2.22 a 2.24.



Obr. 2.47: Metodika výpočtu účinnosti výměníku

$$\eta_{\text{NAB}} = 1 - \frac{Q_{\text{NAB},S}}{Q_{\text{NAB},\text{BEZ}}} \quad (2.20)$$

$$\eta_{\text{VYB}} = 1 - \frac{Q_{\text{VYB},S}}{Q_{\text{VYB},\text{BEZ}}} \quad (2.21)$$

kde	η_{NAB} [-]	je účinnost ZZT při nabíjení výměníku (odsávání vzduchu z místnosti)
	η_{VYB} [-]	je účinnost ZZT při vybíjení výměníku (nasávání vzduchu do místnosti)
	$Q_{\text{NAB},S}$ [J]	je teplo, které pronikne z místnosti do venkovního prostředí za dobu jedné půlperiody, jestliže je v otvoru výměník
	$Q_{\text{NAB},\text{BEZ}}$ [J]	je teplo, které by proniklo z místnosti do venkovního prostředí za dobu jedné půlperiody otvorem bez výměníku (volný otvor)
	$Q_{\text{VYB},S}$ [J]	je teplo, které pronikne z venkovního prostředí do místnosti za dobu jedné půlperiody, jestliže je v otvoru výměník
	$Q_{\text{VYB},\text{BEZ}}$ [J]	je teplo, které by proniklo z venkovního prostředí do místnosti za dobu jedné půlperiody otvorem bez výměníku (volný otvor)

Celkové hodnoty tepel za dobu jedné periody byly vypočítány sečtením dílčích tepel. Dílčí tepla byla vypočítána z naměřených veličin vždy za dobu 1s (tepelný tok je tedy roven přímo teplu). Vzorkovací perioda při měření byla nastavena na 1s, viz kapitola 2.3.

$$Q_{NAB,S} = \sum_{i=1}^{t=\tau/2} \dot{Q}_{NAB,S,i} \quad (2.22)$$

$$Q_{NAB,BEZ} = \sum_{i=1}^{t=\tau/2} \dot{Q}_{NAB,BEZ,i} \quad (2.23)$$

$$Q_{VYB,S} = \sum_{i=1}^{t=\tau/2} \dot{Q}_{VYB,S,i} + \dot{Q}_{W,VYB,i} \quad (2.24)$$

$$Q_{VYB,BEZ} = \sum_{i=1}^{t=\tau/2} \dot{Q}_{VYB,BEZ,i} \quad (2.25)$$

kde	$\dot{Q}_{NAB,S,i}$ [J]	je teplo, které pronikne z místnosti do venkovního prostředí za dobu 1 s, jestliže je v otvoru výměník
	$\dot{Q}_{NAB,BEZ,i}$ [J]	je teplo, které by proniklo z místnosti do venkovního prostředí za dobu 1 s otvorem bez výměníku (volný otvor)
	$\dot{Q}_{VYB,S,i}$ [J]	je teplo, které pronikne z venkovního prostředí do místnosti za dobu 1 s, jestliže je v otvoru výměník
	$\dot{Q}_{VYB,BEZ,i}$ [J]	je teplo, které by proniklo z venkovního prostředí do místnosti za dobu 1 s otvorem bez výměníku (volný otvor)
	$\dot{Q}_{W,VYB,i}$ [J]	je teplo uvolněné z výměníku, které je navázané do vlhkosti odpařené z povrchu výměníku
	t [s]	je čas měření (půlperiody)

Poznámka 2.15: Metodika počtů s entalpiemi a jejich symbolické označování

Pro každý časový krok měření bylo počítáno s aktuální hodnotou entalpií (tzn. že nová hodnota entalpie byla počítána vždy po 1 s měření). V dalším textu jsou entalpie označovány bez pořadového indexu „i“ pro zachování přehlednosti textu.

$$\dot{Q}_{NAB,S,i} = \dot{m}_{V,nab} \cdot (i_{V,out,nab} - \text{MIN}\{i_{V,out,nab}\}) \quad (2.26)$$

$$\dot{Q}_{NAB,BEZ,i} = \dot{m}_{V,nab} \cdot (i_{in} - \text{MIN}\{i_{V,out,nab}\}) \quad (2.27)$$

$$\dot{Q}_{VYB,S,i} = \dot{m}_{V,vyb} \cdot (i_{V,in} - i_{in}) \quad (2.28)$$

$$\dot{Q}_{VYB,BEZ,i} = \dot{m}_{V,vyb} \cdot (\text{MIN}\{i_{V,out,vyb}\} - i_{in}) \quad (2.29)$$

$$\dot{Q}_{W,VYB,i} = \dot{m}_{W,vyb} \cdot l_E \quad (2.30)$$

kde	$\dot{m}_{V,nab}$ [kg _{s.v.} /s]	je hmotnostní tok suchého vzduchu jednotkou při nabíjení výměníku
	$\dot{m}_{V,vyb}$ [kg _{s.v.} /s]	je hmotnostní tok suchého vzduchu jednotkou při vybíjení výměníku
	$\dot{m}_{W,vyb,i}$ [g/s]	je hmotnostní tok vypařované vlhkosti při vybíjení výměníku
	$i_{V,out,nab}$ [kJ/kg _{s.v.}]	je entalpie vzduchu na vnější straně výměníku při nabíjení výměníku
	$MIN\{i_{V,out,nab}\}$ [kJ/kg _{s.v.}]	je minimální hodnota entalpie vzduchu na vnější straně při nabíjení výměníku
	$MIN\{i_{V,out,vyb}\}$ [kJ/kg _{s.v.}]	je minimální hodnota entalpie vzduchu na vnější straně při vybíjení výměníku
		výměníku naměřená po dobu jedné periody (τ)
	i_{in} [kJ/kg _{s.v.}]	je entalpie vzduchu uvnitř místnosti
	$i_{V,in}$ [kJ/kg _{s.v.}]	je entalpie vzduchu na vnitřní straně výměníku
	l_E [J/kg]	je měrné skupenské teplo tání ledu, $l_E = -333$

Výpočet $\dot{m}_{V,nab}$ [6]

$$\dot{m}_{V,nab} = \frac{\dot{m}_{nab}}{1 + x_{in}} \quad (2.31)$$

kde	\dot{m}_{nab} [kg/s]	je hmotnostní tok vlhkého vzduchu pro případ nabíjení výměníku
	x_{in} [g/kg _{s.v.}]	je měrná vlhkost vzduchu v místnosti

K výpočtu hmotnostního toku vlhkého vzduchu byla použita stavová rovnice ideálního plynu (pro vlhký vzduch ji lze s malou nepřesností použít).

$$\dot{m}_{nab} = \frac{p \cdot \dot{V}_{nab}}{r_V \cdot (t_{in} + 273,15)} \quad (2.32)$$

kde	p [Pa]	je barometrický tlak vzduchu v nadmořské výšce místa měření
	\dot{V}_{nab} [m ³ /s]	je objemový průtok vlhkého vzduchu jednotkou při nabíjení (hodnota viz tabulka 2.11, příp. rovnice 2.18)
	r_V [J/kg/K]	je měrná plynová konstanta suchého vzduchu, $r_V = 287$
	t_{in} [°C]	je teplota vnitřního vzduchu

$$p = p_{měř} \frac{16\,000 - h}{16\,000 + h} \quad (2.33)$$

kde	$p_{měř}$ [Pa]	je naměřený barometrický tlak (viz poznámka 2.13)
		přepočtený na hladinu moře
	h [m. n. m.]	je nadmořská výška v místě měření

Měření jednotky probíhalo v nadmořské výšce $h = 249$ m. n. m.

Měrná vlhkost vnitřního vzduchu byla počítána dle vzorce pro měrnou vlhkost nenasyčeného vzduchu (předpokladem bylo, že relativní vlhkost vzduchu v místnosti nedosáhne hodnoty 100 %).

$$x_{in} = 0,622 \frac{\varphi_{in} \cdot p_{p,in}''}{p - \varphi_{in} \cdot p_{p,in}''} \quad (2.34)$$

kde φ_{in} [-] je relativní vlhkost vzduchu v místnosti
 $p_{p,in}$ [Pa] je parciální tlak sytých vodních par

Výpočet parciálního tlaku sytých par vnitřního vzduchu [7]:

- pro $t_{in} = 0$ až 80 °C:

$$p_{p,in}'' = \exp\left(23,58 - \frac{4044,2}{235,6 + t_{in}}\right) \quad (2.35)$$

- pro $t_{in} = -20$ až 0 °C:

$$p_{p,in}'' = \exp\left(28,926 - \frac{6148}{273,15 + t_{in}}\right) \quad (2.36)$$

Výpočet $m_{V,vyb}$

$$\dot{m}_{V,vyb} = \frac{\dot{m}_{vyb}}{1 + x_{V,out,vyb}} \quad (2.37)$$

kde m_{vyb} [kg/s] je hmotnostní tok vlhkého vzduchu pro případ vybíjení výměníku
 $x_{V,out,vyb}$ [g/kg_{s.v.}] je měrná vlhkost vzduchu na venkovní straně výměníku při režimu vybíjení výměníku

$$\dot{m}_{vyb} = \frac{p \cdot \dot{V}_{vyb}}{r_v \cdot (t_{V,in} + 273,15)} \quad (2.38)$$

kde V_{vyb} [m³/s] je objemový průtok vlhkého vzduchu jednotkou při vybíjení (hodnota viz tabulka 2.11, příp. rovnice 2.18)
 $t_{V,in}$ [°C] je teplota vzduchu na vnitřní straně výměníku

$$x_{V,out,vyb} = 0,622 \frac{\varphi_{V,out,vyb} \cdot p_{p,V,out}''}{p - \varphi_{V,out,vyb} \cdot p_{p,V,out}''} \quad (2.39)$$

kde $\varphi_{V,out,vyb}$ [-] je relativní vlhkost vzduchu na venkovní straně výměníku při režimu vybíjení výměníku
 $p_{p,V,out}$ [Pa] je parciální tlak sytých vodních par ve vzduchu na venkovní straně výměníku

Relativní vlhkost vzduchu na venkovní straně výměníku $\varphi_{V,out,vyb}$ nebyla měřena. Pro její zjištění bylo použito přepočtu z relativní vlhkosti vzduchu ve venkovním prostředí.

$$\varphi_{V,out,vyb} = \varphi_{out} \frac{p_{p,out}''}{p_{p,V,out}''} \quad (2.40)$$

kde φ_{out} [-] je relativní vlhkost vzduchu ve venkovním prostředí
 $p_{p,out}$ [Pa] je parciální tlak sytých vodních par ve vzduchu ve venkovním prostředí

Podle rovnic č. 2.35 a 2.36 byl proveden **výpočet $p_{p,out}''$** s tím rozdílem, že místo teploty t_{in} byla do vzorců dosazena teplota t_{out} a také byl proveden **výpočet $p_{p,V,out}''$** s tím rozdílem, že místo teploty t_{in} byla do vzorců dosazena teplota $t_{V,out}$.

kde $t_{V,out}$ [°C] je teplota vzduchu na venkovní straně výměníku

Výpočet $\dot{m}_{W,vyb}$

V průběhu nabíjení výměníku (odsávání vzduchu z místnosti) docházelo ke kondenzaci vlhkosti obsažené ve vzduchu na stěnách výměníku.

$$\dot{m}_{W,vyb} = \sum_{i=1}^{\tau/2} \dot{m}_{W,nab,i} (x_{in,i} - x_{V,out,nab,i}'') \quad (2.41)$$

kde $x_{V,out,nab,i}$ " [g/kg_{s.v.}] je měrná vlhkost nasyceného vzduchu na vnější straně výměníku, dále v textu je označována bez pořadového indexu „i“ jako $x_{V,out,nab}$

Výpočet $i_{V,out,nab}$ [6]

Při výpočtu hodnoty entalpie na venkovní straně výměníku při režimu nabíjení bylo přihlíženo k hodnotě relativní vlhkosti vzduchu na vnější straně výměníku.

- pro $\varphi_{V,out} < 100$ % (vzduch není plně nasycen vlhkostí) a libovolnou hodnotu $t_{V,out}$:

$$i_{V,out,nab} = c_A t_{V,out} + x_{in} (1,84 t_{V,out} + 2500) \quad (2.42)$$

kde c_A [kJ/kg/K] je měrná tepelná kapacita suchého vzduchu, $c_A = 1,01$

- pro $\varphi_{V,out} > 100$ % (vzduch je přesycen vlhkostí) a $t_{V,out} > 0$ °C:

$$i_{V,out,nab} = c_A t_{V,out} + x_{in} (1,84 t_{V,out} + 2500) + (x_{in} - x_{V,out,nab}'') c_w t_{V,out} \quad (2.43)$$

kde c_w [kJ/kg/K] je měrná tepelná kapacita vody, $c_w = 4,187$

- pro $\varphi_{V,out} > 100\%$ (vzduch je přesycen vlhkostí) a $t_{V,out} < 0\text{ °C}$:

$$i_{V,out,nab} = c_A t_{V,out} + x_{in} (1,84 t_{V,out} + 2500) + (x_{in} - x_{V,out,nab}'') (l_E + c_E t_{V,out}) \quad (2.44)$$

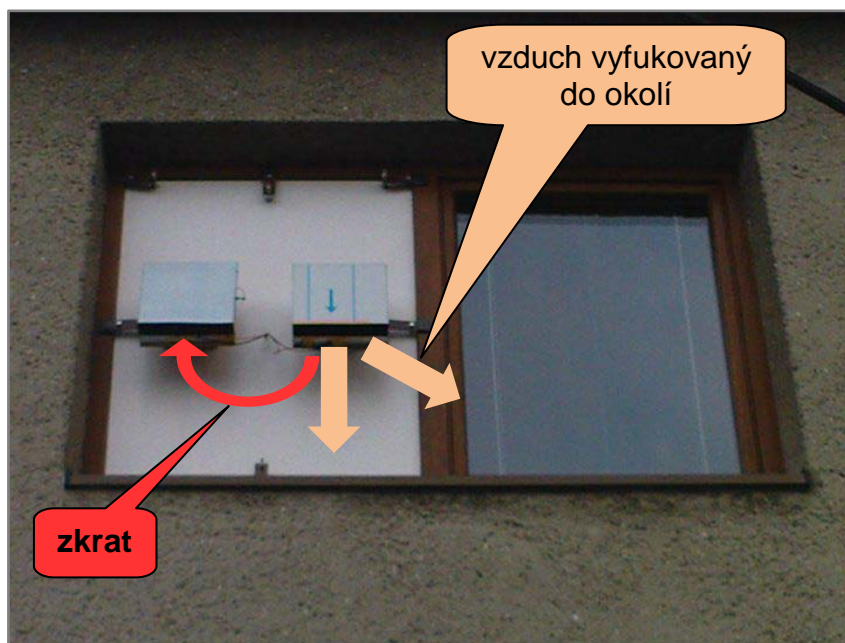
kde c_E [kJ/kg/K] je měrná tepelná kapacita ledu, $c_E = 2,09$

$$x_{V,out,nab}'' = 0,622 \frac{\varphi_{V,out,nab}'' \cdot p_{p,V,out}''}{p - \varphi_{V,out,nab}'' \cdot p_{p,in}''} \quad (2.45)$$

kde $\varphi_{V,out,nab}''$ [-] je relativní vlhkost vzduchu nasyceného vlhkostí, $\varphi_{V,out,nab} = 1$

Výpočet $MIN\{i_{V,out,nab}\}$

Poznámka 2.16: Důvod použití entalpie $MIN\{i_{V,out}\}$ ve výpočtech namísto užití entalpie i_{out}



Obr. 2.48: Ovlivnění měření přísáváním vyfukovaného vzduchu

V ideálním případě by při výpočtech parametrů nasávaného venkovního vzduchu (režim vybíjení výměníku) mohla být používána entalpie venkovního vzduchu. V průběhu vyhodnocování dat však bylo zjištěno, že vzduch nasávaný jednotkou neměl teplotu venkovního vzduchu nýbrž měl teplotu vyšší. To bylo dáno geometrickým umístěním obou otvorů měřicí sestavy ve vzájemné blízkosti. V momentě, kdy byl venkovní vzduch přes výměník nasáván, docházelo k přísávání vzduchu vyfukovaného vedlejším otvorem v sestavě – tzv zkratu, viz obrázek 2.48.

Eliminace vlivu zkratu při výpočtu bylo dosaženo zvolením teploty nasávaného vzduchu z jiného měřicího místa, která daný jev více postihuje. Požadavky splňovala teplota na vnější straně výměníku $t_{V,out}$. Teplota $t_{V,out}$ byla ale v čase proměnná, proto byla za hodnotu výpočtovou vzata její minimální hodnota za čas půlperrody nasávání vzduchu $\text{MIN}\{i_{V,out,vyb}\}$.

Minimální hodnota entalpie vzduchu na vnější straně výměníku při odsávání vnitřního vzduchu (režim nabíjení výměníku) $\text{MIN}\{i_{V,out,nab}\}$ byla pro zachování metodiky výpočtu vypočítána stejným způsobem jako $\text{MIN}\{i_{V,out,vyb}\}$.

$$\text{MIN}\{i_{V,out,nab}\} = \text{minimum}\{i_{V,out,nab}\} \forall t \in \langle 0; \tau/2 \rangle \quad (2.46)$$

$$\text{MIN}\{i_{V,out,vyb}\} = \text{minimum}\{i_{V,out,vyb}\} \forall t \in \langle \tau/2; \tau \rangle \quad (2.47)$$

Výpočet i_{in} [6]

$$i_{in} = c_A t_{in} + x_{in} (1,84 t_{in} + 2500) \quad (2.48)$$

kde t_{in} [°C] je teplota vnitřního vzduchu

Výpočet $i_{V,in}$ [6]

$$i_{V,in} = c_A t_{V,in} + x_{V,out,vyb} (1,84 t_{V,in} + 2500) \quad (2.49)$$

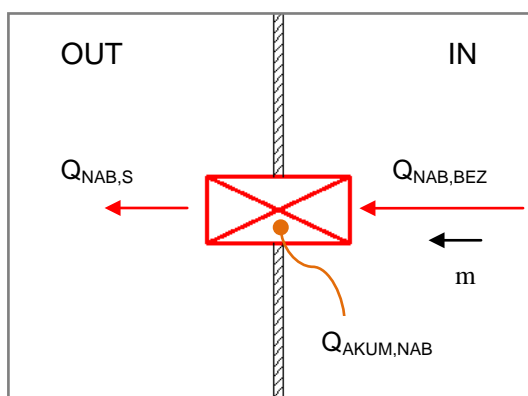
kde $x_{V,out,vyb}$ [g/kg_{s.v.}] je měrná vlhkost na vnější straně výměníku při režimu vybíjení výměníku (nasávání venkovního vzduchu dovnitř)

$$x_{V,out,vyb} = 0,622 \frac{\varphi_{V,out,vyb} \cdot p''_{p,V,out}}{p - \varphi_{V,out,vyb} \cdot p''_{p,V,out}} \quad (2.50)$$

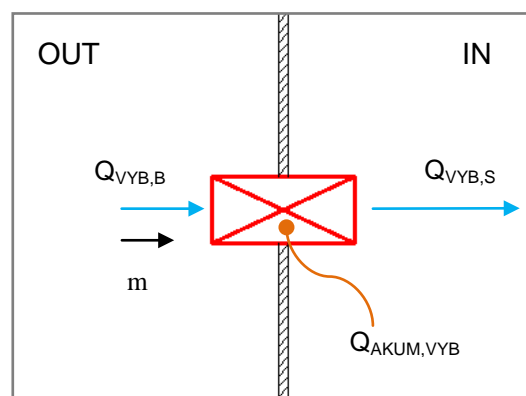
Poznámka 2.17: Rozdílné velikosti tepla naakumulovaného do výměníku a tepla uvolněného z výměníku za dobu jedné periody

Lze předpokládat, že velikost tepla naakumulovaného do výměníku během nabíjecí periody je stejná jako velikost tepla uvolněného z výměníku zpět do vzduchu během vybíjecí půlperiody.

Při praktickém výpočtu účinnosti ZZT výměníku dle rovnic 2.20 až 2.50 s vynecháním členu $Q_{W,VYB,i}$ v rovnici 2.24 bylo zjištěno, že se hodnoty uvedených tepel navzájem liší v některých případech až o 30 %. Konkrétně byla velikost tepla akumulovaného do výměníku vyšší, než velikost tepla z výměníku uvolněného.



Obr. 2.49: Teplo akumulované do hmoty výměníku při nabíjení



Obr. 2.50: Teplo uvolněné z hmoty výměníku při vybíjení

$$Q_{AKUM,NAB} = Q_{NAB,BEZ} - Q_{NAB,S} \quad (2.51)$$

$$Q_{AKUM,VYB} = Q_{VYB,BEZ} - Q_{VYB,S} \quad (2.52)$$

kde $Q_{AKUM,NAB}$ [J] je teplo pohlcené výměníkem při režimu nabíjení
 $Q_{AKUM,VYB}$ [J] je teplo uvolněné z výměníku při režimu vybíjení

Byla zavedena konvence, kdy teplo uvolňované z hmoty výměníku má záporné (-) znaménko a teplo do hmoty výměníku přijímané má kladné (+) znaménko. Hodnota $Q_{AKUM,VYB}$ má tedy záporné znaménko.

Jednou z příčin bylo právě opomenutí vlivu kondenzace vlhkosti na stěnách výměníku. Při odsávání vzduchu ven docházelo ke kondenzaci vlhkosti. Při zpětném nasávání studeného venkovního vzduchu se vlhkost odpařovala zpět do vzduchu. Vypařená vlhkost odebrala vzduchu část citelného tepla a přeměnila jej na teplo vázané. Vázané teplo ale nebylo za výměníkem nijak měřením postihnuto (probíhalo zde pouze měření teploty, konkrétně $t_{v,out}$, které postihuje pouze citelnou složku tepla).

Pro eliminaci vlivu vlhkosti bylo přistoupeno k výpočtu množství vody zkondenzované při půlperiodě nabíjení výměníku. Byl zaveden předpoklad, že všechna vysrážená vlhkost se při režimu vybíjení výměníku odpaří zpět do vzduchu, tzn. žádná vlhkost neodteče z jednotky pryč. Lze se ale domnívat, že část zkondenzované vlhkosti přece jen odteče z jednotky pryč. Určit toto množství

vyžaduje navíc měření vlhkosti vzduchu za jednotkou, což v měřeních pro tuto práci nebylo provedeno.

Zkondenzované množství vody (viz rovnice 2.41) bylo použito k výpočtu velikosti vázaného tepla, které je v podobě odpařování vlhkosti do vzduchu z výměníku uvolňováno a vraceno do místnosti. Celková hodnota vázaného tepla uvolněného z výměníku byla jednorázově přičtena k hodnotě tepla, které prošlo jednotkou při vybíjení výměníku, viz rovnice 2.24.

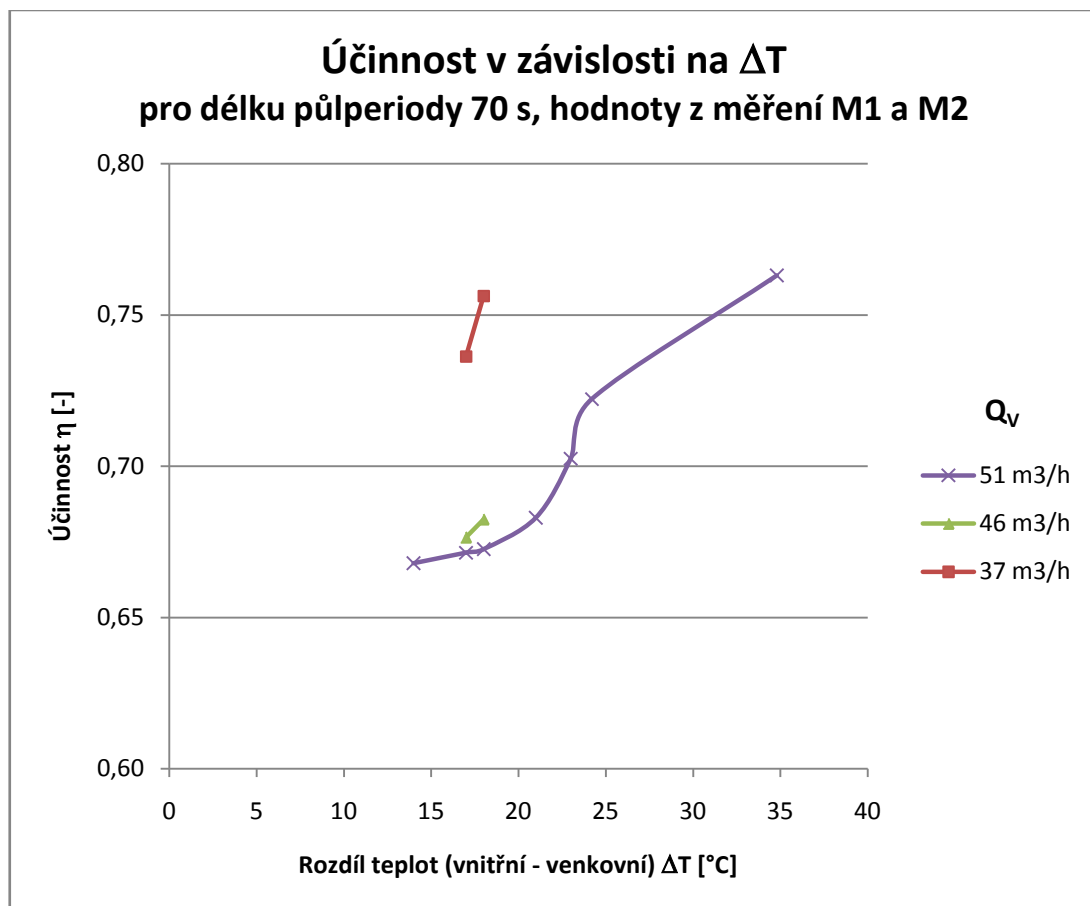
Další příčinou rozdílných velikostí tepla pohlceného výměníkem a z tepla výměníku uvolněného mohou být chyby měření. Jiné příčiny nebyly v době tvorby této práce známy.

Po aplikaci změny metodiky výpočtu zahrnutím vlivu kondenzace vlhkosti klesl rozdíl mezi velikostmi uvedených tepel o 10 % na konečných maximálně 20 %.

Pozn. k textu: výrazem „maximálně“ v předchozí větě znamená, že velikost rozdílu uvedených tepel byla v mnoha případech měření nižší, nejčastější hodnotou bylo 12 %.

Účinnost systému pro jednotlivé zkušební scénáře

Po vyhodnocení naměřených dat byly k prezentaci výsledků vybrány pouze nejnázornější grafy, jejichž přehled je vyobrazen na obrázku 2.46.



Obr. 2.51: Graf účinnosti v závislosti na rozdílu teplot mezi vnitřním a venkovním prostředím, hodnoty ze sérií měření č. 1 a č. 2

M1 + M2 CELKOVÁ účinnost výměníku η [%]								
délka půlperiody		$\tau/2$ [s]	70	směr	(NAB+VYB) / 2			
objemový průtok vzduchu	napětí	rozdíl teplot (vnitřní - venkovní)						
Q,v	U	delta T						
m3/h	V	°C						
		14.0	17.0	18.0	21.0	23.0	24.2	34.8
51	12.0	0.67	0.67	0.67	0.68	0.70	0.72	0.76
46	10.5		0.68	0.68				
37	7.2		0.74	0.76				

Tab. 2.12: Celková účinnost jednotky v závislosti na rozdílu teplot mezi vnitřním a venkovním prostředím

Z obrázku 2.51 je patrné, že při stoupajícím rozdílu teplot mezi vnitřním a venkovním prostředím roste i účinnost systému. Dále je vidět závislost účinnosti na průtoku vzduchu jednotkou resp. na napětí na ventilátorech, kdy při snižujícím se průtoku vzduchu roste účinnost ZZT. Přesné hodnoty jednotlivých účinností jsou tabelovány v tabulce č. 2.51.

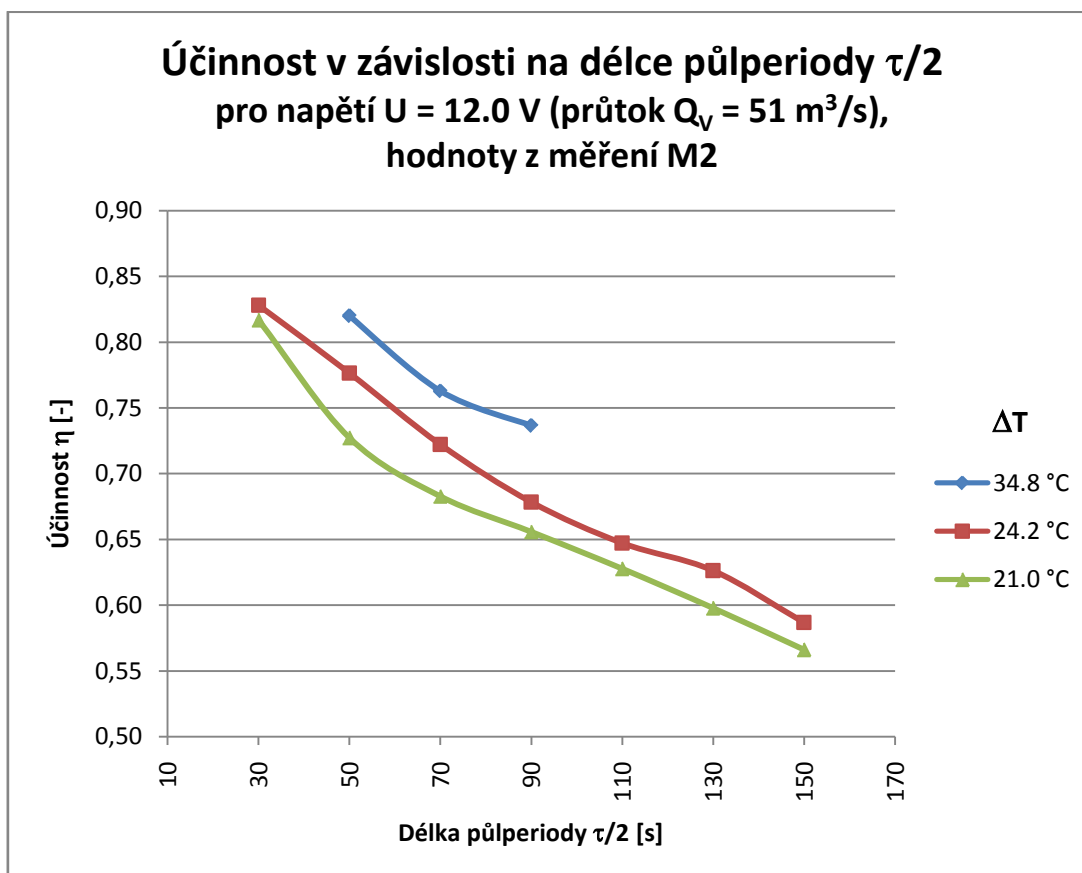
Poznámka 2.18: Korekce hodnot účinnosti v tabulce č. 2.12

Při vyhodnocování závislosti účinnosti na rozdílu teplot ΔT vybočovala hodnota pro $Q_v = 51 \text{ m}^3/\text{s}$ při $\Delta T = 23,0 \text{ }^\circ\text{C}$ z trendu všech ostatních hodnot (byla vyšší, než by měla být, aby kopírovala sledovaný trend), proto bylo přistoupeno ke korekci této hodnoty účinnosti. Jako korigovaná hodnota byla vzata průměrná hodnota ze dvou okolních hodnot, tzn. pro $\Delta T = 21,0 \text{ }^\circ\text{C}$ a pro $\Delta T = 24,2 \text{ }^\circ\text{C}$.

V tabulce 2.13 lze najít konkrétní hodnoty vnitřní a venkovní teploty pro jednotlivé teplotní rozdíly ΔT .

rozdíl teplot $t_{in} - t_{out}$	ΔT	$^\circ\text{C}$	14.0	17.0	18.0	21.0	23.0	24.2	34.8
teplota v interiéru	t_{in}	$^\circ\text{C}$	20.1	20.8	20.9	21.8	19.4	17.9	18.0
teplota v exteriéru	t_{out}	$^\circ\text{C}$	6.1	3.8	2.9	0.8	-3.6	-6.4	-16.8

Tab. 2.13: Hodnoty vnitřních a venkovních teplot pro jednotlivé teplotní spády

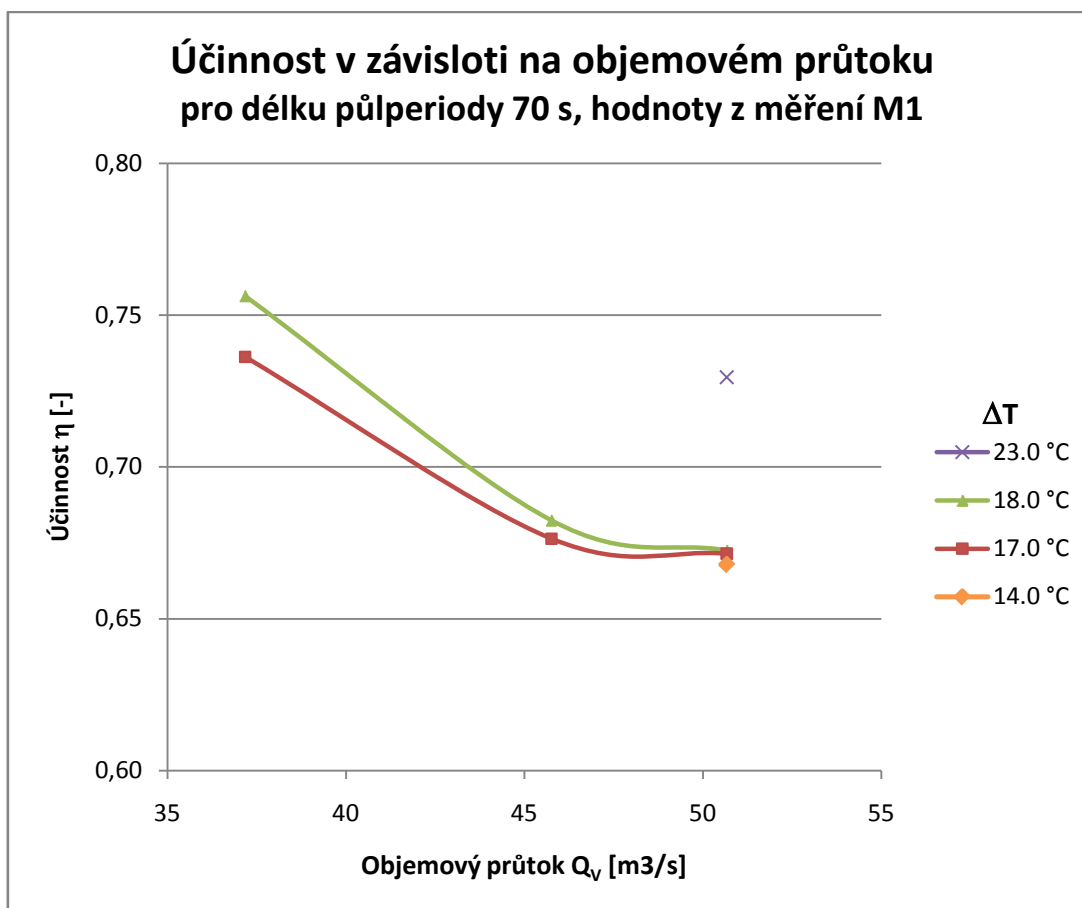


Obr. 2.52: Graf účinnosti v závislosti na délce půlperiody přepínání pro napětí 12.0 V, hodnoty ze série měření č. 2

Poznámka 2.19: Vysvětlení k označení směru proudění v tabulce č. 2. 12

V tabulce č. 2.12 je označen směr proudění jako „(NAB+VYB) / 2“. Uvedené označení znamená, že se jedná o průměrné hodnoty objemového průtoku vzduchu jednotkou a o průměrné hodnoty účinností jednotky. Průměrná hodnota je vypočítána jako aritmetický průměr z hodnot pro nabíjení a pro vybíjení výměníku.

Na obrázku 2.52 lze pozorovat závislost účinnosti na délce půlperiody přepínání. Při zkracující se délce půlperiody roste účinnost. Tohoto jevu se dá využít pouze v omezené míře, neboť je třeba si uvědomit, že při zkracující se délce půlperiody nedochází k provětrání celé místnosti, ale provětrává se pouze okolí jednotky. Podrobnější vysvětlení: Vezměme si modelový případ, kdy jednotky provětrávají jednu místnost. V místnosti je nainstalován jeden pár jednotek (důvod, proč musí jednotky pracovat vždy v páru, je uveden v kapitole č. 5). Při dostatečně dlouhé délce půlperiody se venkovní vzduch přiváděný jednotkami dostane do dostatečné vzdálenosti do jednotek a dochází ke směšování vzduchu přiváděného se vzduchem vnitřním v objemu celé místnosti. Dochází tak k provětrávání směšovacím způsobem v celé místnosti. Pokud je délka půlperiody příliš krátká, dochází k výměně vzduchu pouze v malém okolí jednotky a kvalita provětrávání celého objemu místnosti je nízká. Pro stanovení vhodné délky půlperiody výrobce pravděpodobně přistoupil ke kompromisu a zvolil délku půlperiody (výrobce označuje délku půlperiody jako délku periody) 70 s.



Obr. 2.53: Graf účinnosti v závislosti na objemovém průtoku vzduchu jednotkou pro délku půlperiody 70 s, hodnoty ze série měření č. 1

Obrázek 2.53 ukazuje závislost účinnosti na objemovém průtoku vzduchu jednotkou (resp. v závislosti na napětí na ventilátorech). Stejnou závislost v jiném vyobrazení lze pozorovat i na obrázku č. 2.51.

Další grafy účinnosti pro další hodnoty parametrů jsou uvedeny v příloze č. 3.

2.4.3 Křivky úplného nabíjení a úplného vybíjení – validační křivky

Kapitola se zabývá stanovením křivek úplného nabíjení a úplného vybíjení regeneračního výměníku. Výsledné křivky (dále v textu označované jako „validační křivky“) byly využity ke kalibraci CFD výpočtů jednotky tak, aby se výsledky z měření reálného modelu a výsledky výpočtů z kalibrovaného CFD modelu co nejvíce shodovaly, viz kapitola 3.

Omezení rozsahu vyhodnocovaných dat

Práce se dále zabývá výpočtem a konstrukcí pouze validačních křivek úplného vybíjení výměníku. Důvodem je vyloučení vlivu zkondenzované vody na výsledky měření, neboť při CFD výpočtech tento vliv z důvodu zjednodušení náročnosti výpočtů nebyl brán v potaz. Vyloučení vlivu zkondenzované vlhkosti, resp. jeho odstranění, bylo možno pouze u křivek úplného vybíjení.

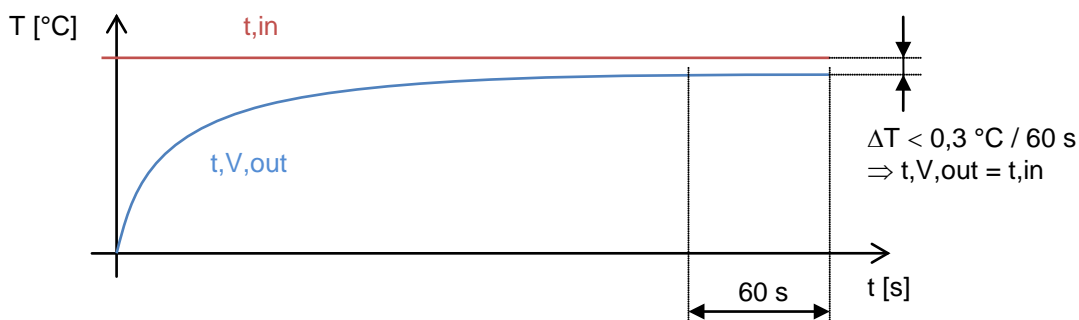
Konkrétně byly vyhodnocovány křivky pro teplotu před výměníkem – $t_{v,out}$, sloužící jako okrajová podmínka na vstupu vzduchu do výměníku při CFD simulaci. Dále byly vyhodnocovány křivky pro teplotu za výměníkem – $t_{v,in}$, sloužící k porovnání s teplotou vzduchu vystupujícího z výměníku při CFD simulaci. Křivka pro teplotu ve středu výměníku byla vyhodnocena pro případnou kontrolu průběhu teplot ve středu výměníku při CFD simulaci.

Metodika měření

Samotné zaznamenávání dat při měření do počítače bylo popsáno v kapitole 2.3.

Poznámka 2.20: Přechodné jevy při nabíjení a vybíjení výměníku – zjednodušení terminologie

V dalším textu bylo přistoupeno ke zjednodušení terminologie označování teplot v průběhu dějů závislých na čase. Nabíjení a vybíjení výměníku je jevem přechodným, kdy se teplota výměníku vždy pouze přibližuje teplotě vzduchu proudícího výměníkem. Jestliže se teplota vzduchu po průchodu výměníkem v čase příliš nelišila (tzn. v případě měření křivek úplného nabíjení a úplného vybíjení o hodnotu menší než $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ za dobu 60 s), byla považována za ustálenou. O teplotě výměníku pak bylo prohlášeno, že dosáhla teploty vzduchu, který proudí výměníkem. Ve skutečnosti se teplota výměníku pouze přiblížila teplotě vzduchu, který výměníkem proudí, tento fakt byl ale dále zanedbán.



Obr. 2.54: Zjednodušení při přechodném ději

Měření sestávalo z:

1. úplné nabití výměníku a odpaření kondenzátu z povrchu výměníku

Na začátku měření bylo spuštěno odsávání vzduchu z místnosti přes jednotku. Studený výměník se začal nabíjet od tepla obsaženého ve vzduchu z místnosti. Zároveň docházelo ke kondenzaci vlhkosti na stěnách výměníku, neboť výměník měl teplotu nižší, než byla teplota rosného bodu vnitřního vzduchu. Jakmile se teplota výměníku zvýšila nad teplotu rosného bodu, zkondenzovaná vlhkost se začala zpět odpařovat. Po odpaření vlhkosti se výměník dál ohříval až na teplotu vnitřního vzduchu t_{in} (ve skutečnosti pouze na teplotu blížíící se teplotě t_{in} – viz poznámka 2.20).

2. změna směru proudění vzduchu

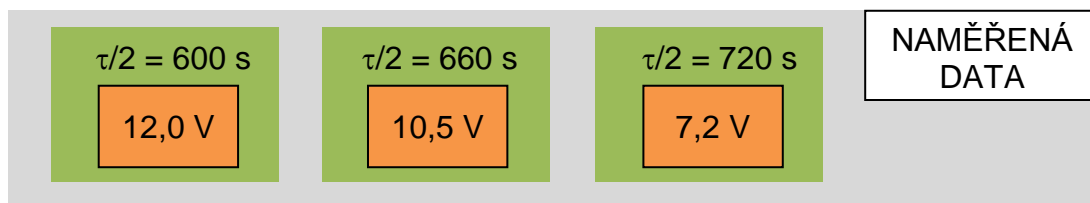
Po nabití výměníku (dosažení teploty vnitřního vzduchu t_{in}) došlo ke změně směru otáčení ventilátorů a tím k nasávání vzduchu do místnosti.

3. měření teplot na okrajích a uprostřed výměníku po dobu do úplného vybití výměníku

Po dobu vybíjení výměníku nemohla na výměníku kondenzovat žádná vlhkost, neboť výměník měl po celou dobu měření teplotu vyšší, než byla teplota rosného bodu venkovního vzduchu. Možnost kondenzace vlhkosti na stěnách výměníku byla tímto vyloučena.

Naměřená data

Křivky úplného nabíjení a úplného vybíjení byly naměřeny pro tři úrovně napětí na ventilátorech (tři hodnoty průtoků vzduchu jednotkou), viz obrázek č. 2.55.



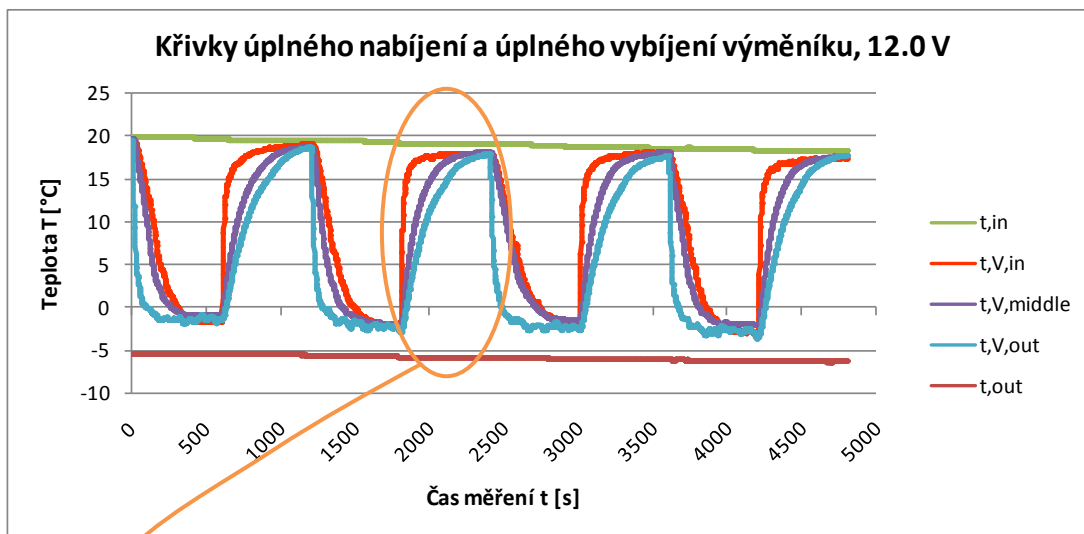
Obr. 2.55: Přehled naměřených dat

Pro každé měření je dále v textu uvedena tabulka s konkrétními podmínkami při měření. Vysvětlení, proč byla použita jako okrajová podmínka teploty nasávaného vzduchu výměníkem právě teplota $\text{MIN}\{t_{v,\text{out}}\}$ je podáno v poznámce č. 2.16.

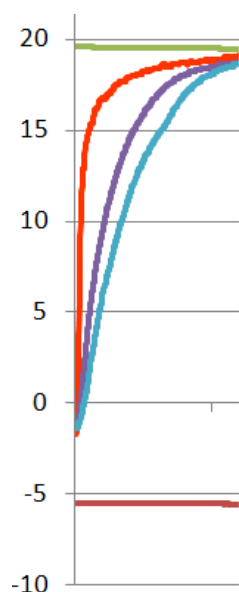
U = 12,0 V

Tab. 2.14: Podmínky měření při měření křivek úplného nabíjení a úplného vybíjení výměníku, 12.0 V

PODMÍNKY MĚŘENÍ, 12.0 V				ΔT [°C]
vnitřní teplota	t_{in}	°C	18.6	21.6
min. teplota na vnější straně výměníku	$\text{MIN}\{t_{V,out}\}$	°C	- 3.0	
doba nabíjení/vybíjení	$\tau/2$	s	600	-
počet měření každé periody	n,τ	-	4	-



Obr. 2.56: Křivky úplného nabíjení a úplného vybíjení – naměřená data, 12.0 V



Obr. 2.57: Křivky úpl. nab. a úpln. vyb. - detail

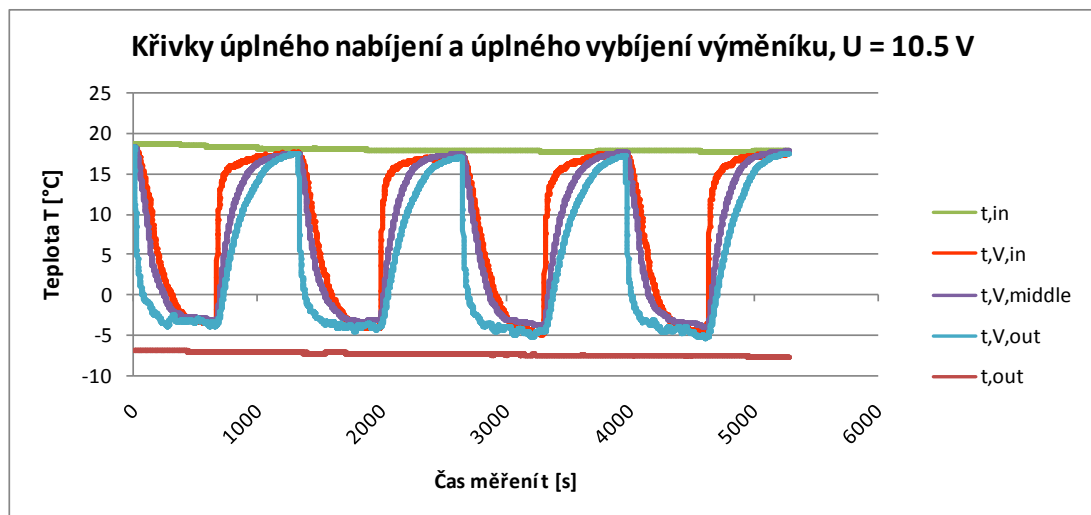
Na obrázku 2.57 (legenda viz obr. 2.56) lze pozorovat průběhy teplot vzduchu v těsném okolí výměníku. Lze předpokládat, že tvary průběhů všech teplot v okolí výměníku budou mít exponenciální průběh. Tento předpoklad se potvrdil pouze po kvalitativním posouzení průběhů teplot $t_{V,in}$ a $t_{V,middle}$, v případě průběhu teploty $t_{V,out}$ lze pozorovat kolem její hodnoty okolo 15 °C odchýlení od exponenciálního průběhu.

Lze vyslovit domněnku, že odchýlení od ideálního průběhu způsobilo vypařování vlhkosti z povrchu výměníku (spotřebovávalo se citelné teplo z proudícího vzduchu a docházelo k jeho přeměně na teplo latentní, což se projevilo snížením teploty vzduchu v místě měření).

$U = 10,5 \text{ V}$

Tab. 2.15: Podmínky měření při měření křivek úplného nabíjení a úplného vybíjení výměníku, 12.0 V

PODMÍNKY MĚŘENÍ, 10.5 V				$\Delta T \text{ [}^\circ\text{C]}$
vnitřní teplota	t_{in}	$^\circ\text{C}$	17.8	23.2
min. teplota na vnější straně výměníku	$\text{MIN}\{t_{V,out}\}$	$^\circ\text{C}$	- 5.4	
doba nabíjení/vybíjení	$\tau/2$	s	660	-
počet měření každé periody	n, τ	-	4	-

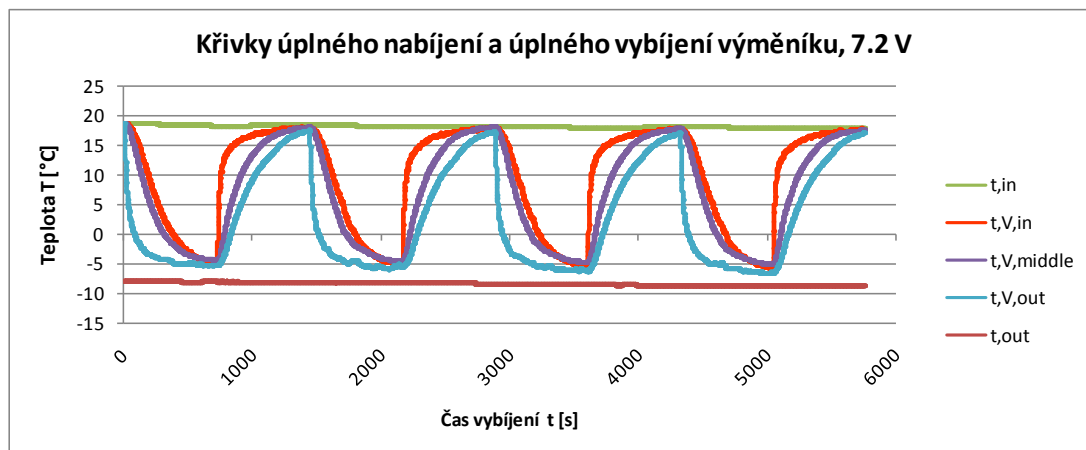


Obr. 2.58: Křivky úplného nabíjení a úplného vybíjení – naměřená data, 10.5 V

U = 7,2 V

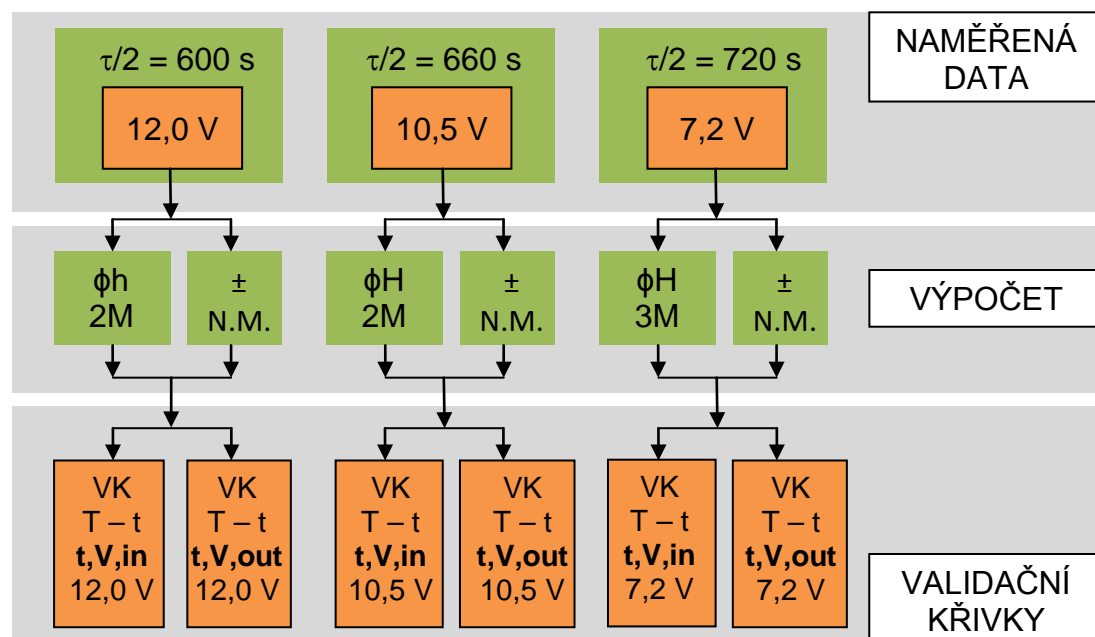
Tab. 2.16: Podmínky měření při měření křivek úplného nabíjení a úplného vybíjení výměníku, 12.0 V

PODMÍNKY MĚŘENÍ, 7.2 V				ΔT [°C]
vnitřní teplota	t_{in}	°C	18.1	24.7
min. teplota na vnější straně výměníku	$\text{MIN}\{t_{V,out}\}$	°C	- 6.6	
dobu nabíjení/vybíjení	$\tau/2$	s	720	-
počet měření každé periody	n,τ	-	4	-



Obr. 2.59: Křivky úplného nabíjení a úplného vybíjení – naměřená data, 7.2 V

Vyhodnocení dat



Obr. 2.60: Přehled naměřených dat a jejich vyhodnocení

kde	ϕ_H 2M	je průměrná hodnota ze dvou měření křivek vybíjení (tzn. ze dvou vybíjecích cyklů)
	ϕ_H 3M	je průměrná hodnota ze tří měření křivek vybíjení (tzn. ze tří vybíjecích cyklů)
	\pm N. M.	je nejistota měření
	VK	je zkratka znamenající „validační křivka“

Vyhodnocení dat bylo realizováno podle postupu dle obrázku č. 2.60. Z naměřených dat byly vzaty dvě resp. tři křivky měření a z nich byl vytvořen aritmetický průměr. Rovněž byla pro tyto hodnoty vypočítána nejistota měření. Výsledné hodnoty byly vyneseny do grafů.

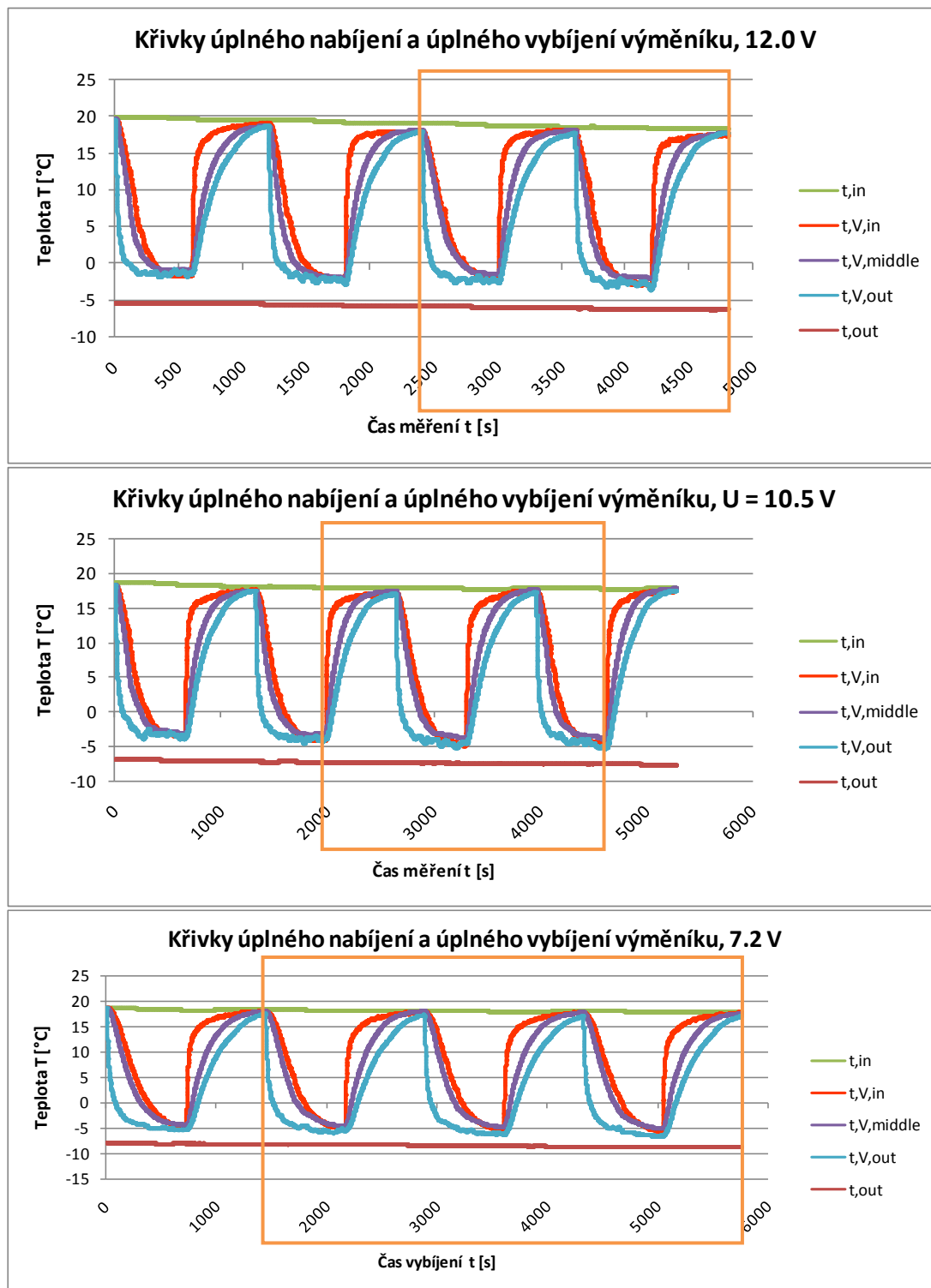
Poznámka 2.21: Určení počtu cyklů, ze kterých byly vytvářeny průměrné hodnoty křivek úplného nabíjení a úplného vybíjení výměníku

Během měření křivek úplného nabíjení a úplného vybíjení výměníku docházelo ke změně okrajových podmínek měření v čase. Jelikož výměník nemá 100 % účinnost, docházelo k tepelnému toku směrem ven z místnosti. Tepelný tok způsoboval postupné snižování teploty vzduchu uvnitř místnosti. Postupnému snižování teploty vzduchu v místnosti bylo zčásti zabraňováno vytápěním pomocí otopného tělesa ústředního topení a pomocí elektrického topného přístroje, konkrétně fěnu na vlasy. Také teplota venkovního vzduchu nebyla po čase měření konstantní.

Původním záměrem bylo provádět výpočty se všemi čtyřmi naměřenými cykly u každé úrovně napětí, ale příliš velká změna okrajových podmínek by znehodnotila výsledky (velký nárůst nejistot měření – problém při validaci CFD modelu – model by se podařilo snadno vyladit do velkých mezí daných nejistotami – jistota, že model je naladěn správně by byla velmi malá).

Proto byly do výpočtů vzaty pouze hodnoty ze **dvou** vybíjecích cyklů (pro úroveň napětí $U = 12,0 \text{ V}$ a $U = 10,5 \text{ V}$) resp. hodnoty ze **tří** vybíjecích cyklů (pro úroveň napětí $U = 7,2 \text{ V}$).

Konkrétní vybrané cykly jsou vyobrazeny na následujících obrázcích (obr. 2.61).



Obr. 2.61: Výběr hodnot pro výpočty z jednotlivých cyklů

Výpočet probíhal dle následujících vztahů:

1. *Určení aritmetického průměru z vybraného počtu cyklů měření*

$$t_{V,j} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^N t_{V,j,i} \quad (2.53)$$

kde	$t_{V,j}$ [°C]	je průměrná teplota vzduchu z vybraného počtu cyklů měření (aritmetický průměr)
	j [-]	je index charakterizující uvažovanou teplotu, $j = (t_{V,in}; t_{V,middle}; t_{V,out})$
	$t_{V,j,i}$ [°C]	je i -tá teplota vzduchu z vybraného počtu cyklů

2. *Stanovení nejistot měření*

Pro každou teplotu byla vypočtena nejistota měření.

Nejistota typu A:

$$U_{A,j} = R \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_{V,j,i} - t_{V,j})^2}{n - 1}} \quad (2.54)$$

kde	$U_{A,j}$ [°C]	je rozšířená nejistota typu A pro jednotlivé teploty
	KR [-]	je koeficient rozšíření výběrové směrodatné odchylky (část rovnice 2.54, která leží pod odmocninou včetně odmocniny) při $P = 0,90$ je: pro $n = 2 \rightarrow R = 1,886$; pro $n = 3 \rightarrow R = 1,638$, viz tab. 2.7
	P [-]	je interval spolehlivosti, viz tab. 2.7

Nejistota typu B:

$$U_B = \pm 0,2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.55)$$

kde	U_B [°C]	je nejistota typu B, pro termočlánek měď-konstantan $U_B = \pm 0,5 \text{ K}$
-----	------------	--

Kombinovaná nejistota U_C :

$$U_{C,j} = \sqrt{U_{A,j}^2 + U_B^2} \quad (2.56)$$

kde	$U_{C,j}$ [°C]	je kombinovaná nejistota pro aritmetické průměry měřených teplot
-----	----------------	--

3. *Sestavení výsledných hodnot jednotlivých teplot pro následné sestrojení grafů průběhů teplot po čase vybíjení výměníku*

K jednotlivým teplotám byla přičtena jejich nejistota, viz rovnice 2.57 a viz grafy níže.

$$t_{v,j} \pm \text{NEJISTOTA} = t_{v,j} \pm U_{c,j} \quad (2.57)$$

Validační křivky pro CFD simulaci

V podkapitole jsou uvedeny validační křivky, které dále sloužily při CFD simulaci.

- křivky pro teplotu $t_{v,out}$ slouží jako okrajová podmínka na vstupu vzduchu do výměníku při CFD simulaci
- křivky pro teplotu $t_{v,in}$ slouží k porovnání s teplotou vzduchu na výstupu z výměníku při CFD simulaci

Grafy ostatních validačních křivek, konkrétně pro teplotu $t_{v,middle}$, jsou uvedeny v příloze č. 4.

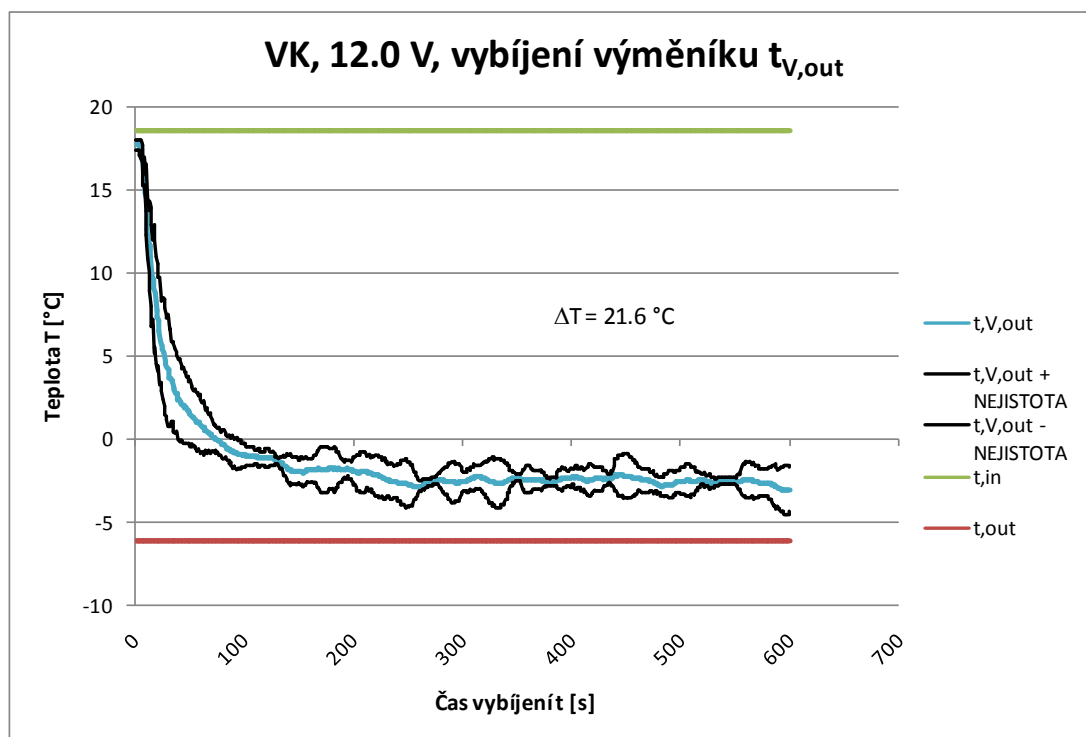
Poznámka 2.22: Popis detailů grafů validačních křivek

V grafech byly použity průměrné hodnoty teplot t_{in} a t_{out} za celý čas vybíjení.

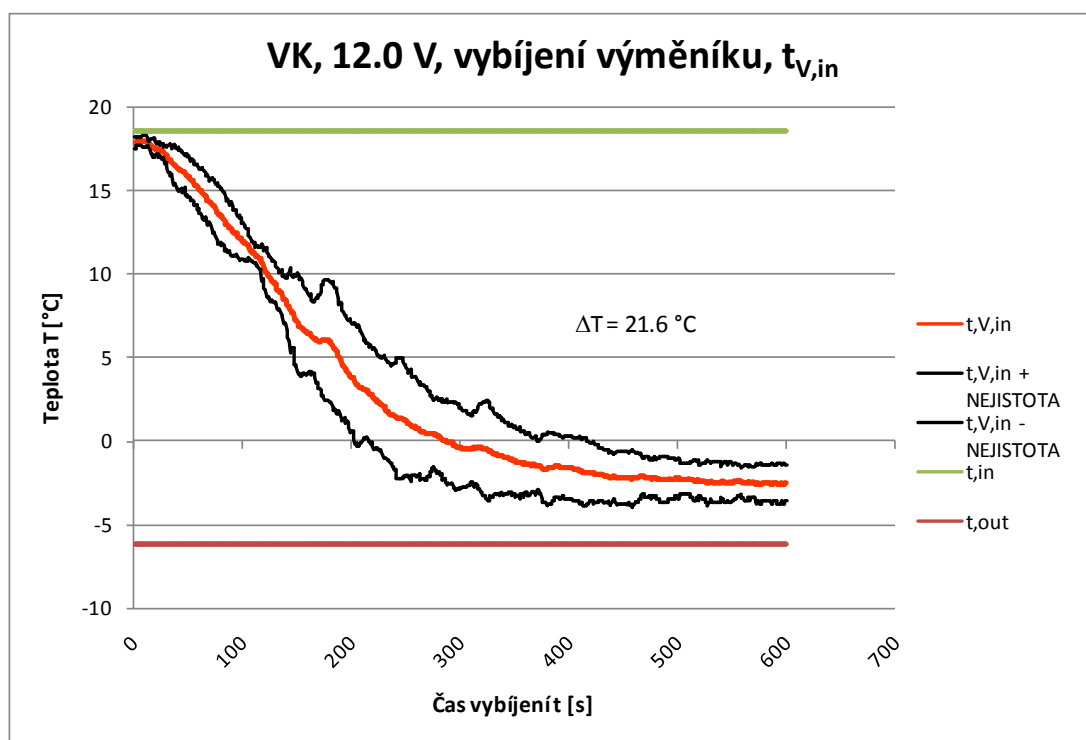
Komentář k tloušťce pásu nejistot:

Horní hraniční čára pásu je definována jako součet hodnoty teploty, ke které byla nejistota počítána, a příslušné nejistoty, např. $t_{v,out} + NEJISTOTA$. Dolní hraniční čára je počítána jako rozdíl hodnoty teploty, ke které byla nejistota počítána, a příslušné nejistoty, např. $t_{v,out} - NEJISTOTA$. V čase $t = 0$ s by měla mít tloušťka pásu nejistot nulovou tloušťku, neboť v ideálním případě by měření začínalo při stejných okrajových podmínkách. Z jednotlivých grafů je patrné, že tloušťka pásu nejistot má nenulovou tloušťku. Příčinou je uskutečnění výpočtu nejistot z více měření, kdy mezi jednotlivými měření došlo ke změně okrajových podmínek (teplota vzduchu se mírně snížila nebo zvýšila oproti předchozímu měření). Z uvedeného poznatku lze vyvodit závěr, že tloušťka pásu nejistot není pouze funkcí chyb při měření, ale je i funkcí změny okrajových podmínek po dobu měření. Změnu okrajových podmínek v průběhu měření se nepodařilo zcela eliminovat, viz poznámka 2.21, tudíž byl její vliv na výsledky výpočtů respektován.

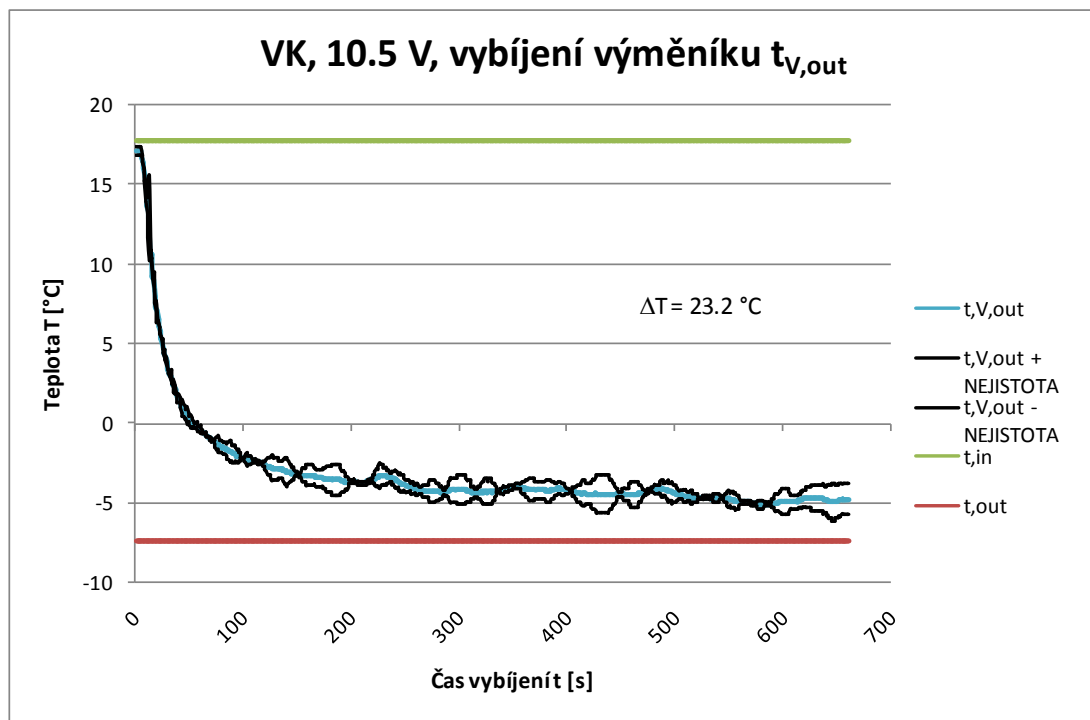
$U = 12,0 \text{ V}$



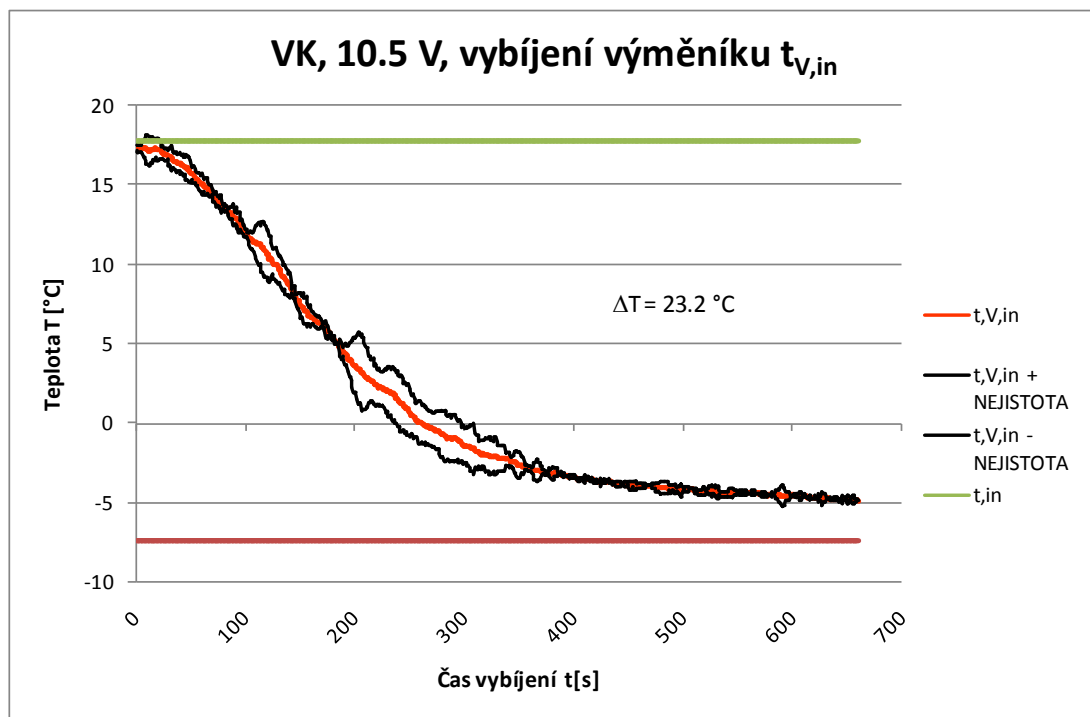
Obr. 2.62: Validační křivka pro režim vybíjení výměníku, teplota před výměníkem $t_{V,out}$; $U = 12,0 \text{ V}$



Obr. 2.63: Validační křivka pro režim vybíjení výměníku, teplota za výměníkem $t_{V,in}$; $U = 12,0 \text{ V}$

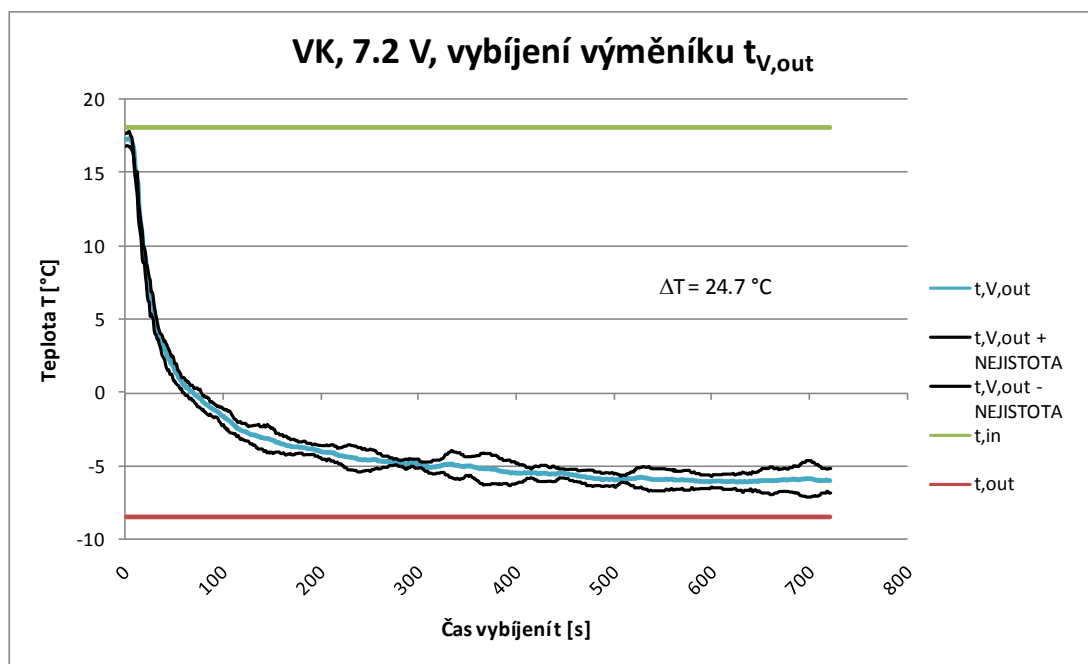
$U = 10,5 \text{ V}$ 

Obr. 2.64: Validační křivka pro režim vybíjení výměníku, teplota před výměníkem $t_{V,out}$;
 $U = 10,5 \text{ V}$

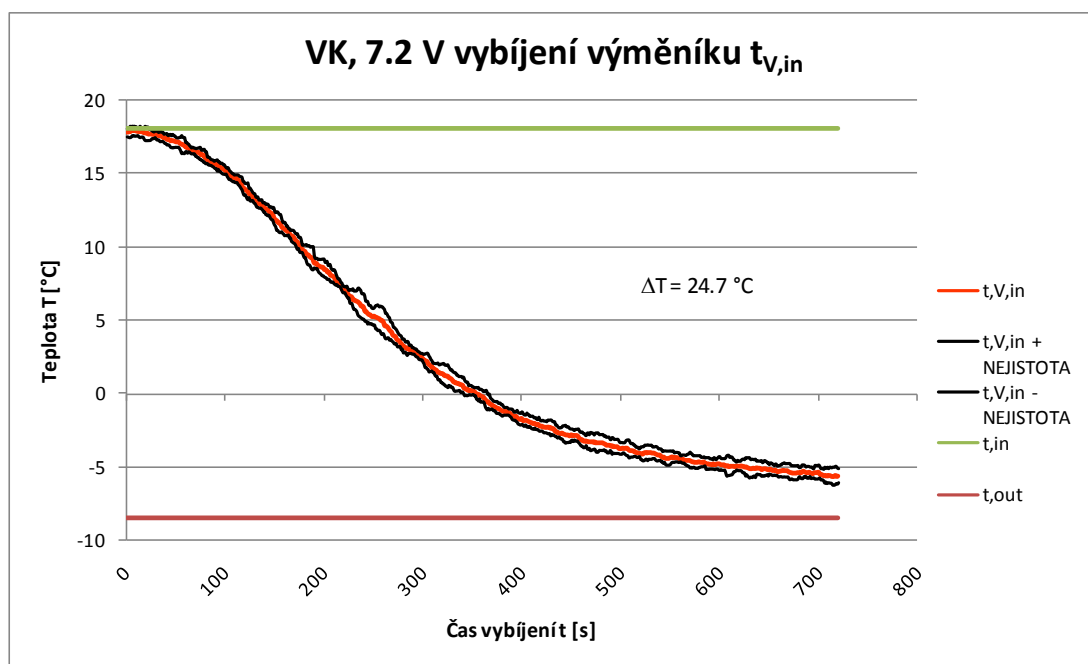


Obr. 2.65: Validační křivka pro režim vybíjení výměníku, teplota za výměníkem $t_{V,in}$;
 $U = 10,5 \text{ V}$

$U = 7,2 \text{ V}$



Obr. 2.66: Validační křivka pro režim vybíjení výměníku, teplota před výměníkem $t_{V,out}$;
 $U = 7,2 \text{ V}$



Obr. 2.67: Validační křivka pro režim vybíjení výměníku, teplota za výměníkem $t_{V,in}$;
 $U = 7,2 \text{ V}$

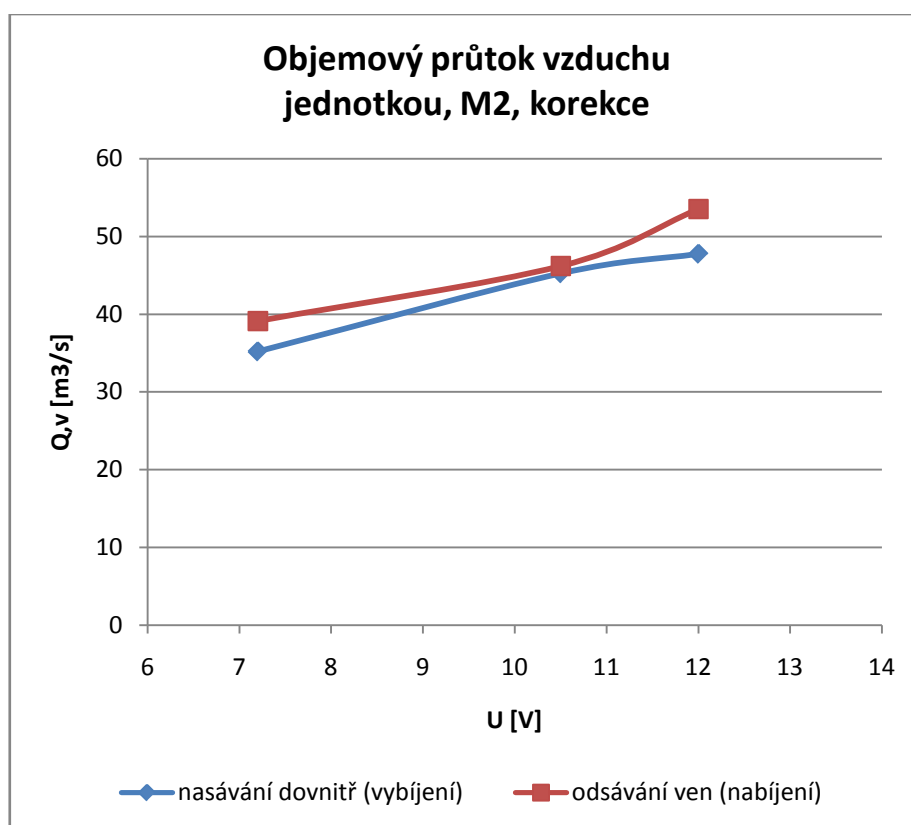
2.4 Shrnutí výsledků

Kapitola č. 2 se zabývala stanovením provozních charakteristik regenerační jednotky se zpětným získáváním tepla (ZZT). Byly stanoveny objemové toky vzduchu přes jednotku, účinnosti ZZT při různých parametrech venkovního a vnitřního vzduchu a byly sestaveny validační křivky pro následnou parametrickou studii jednotky, konkrétně pro studii vlivu tvaru kanálů výměníku na účinnost ZZT.

Kapitola 2.4.4 podává rychlý přehled dosažených výsledků.

1. Rychlosti proudění – průtoky vzduchu

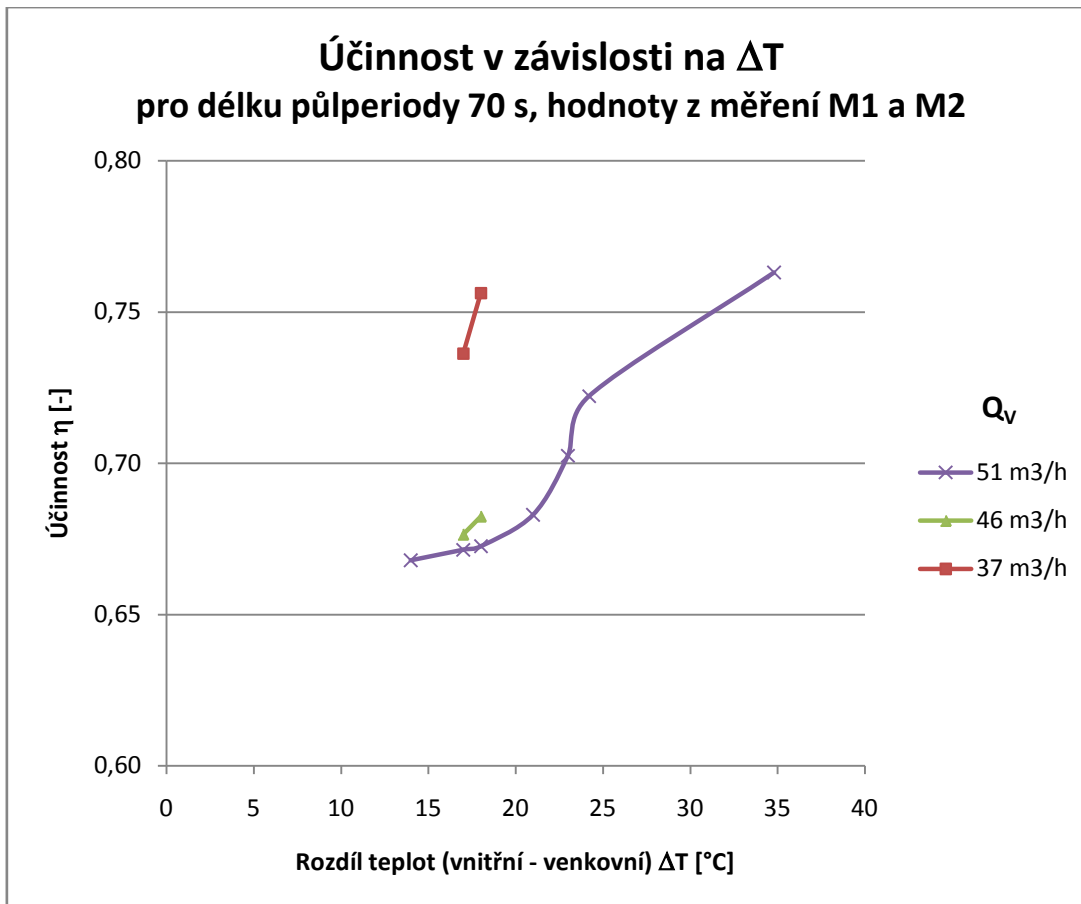
Objemové průtoky byly stanoveny na základě měření lokálních rychlostí v měřicím potrubí umístěném před jednotkou. Dílčí rychlosti byly následně přepočítány na střední rychlost proudění a dále na objemový průtok, to vše pro tři úrovně napětí na ventilátorech.



Obr. 2.68: Přepočítaný objemový průtok vzduchu jednotkou, M2

2. Účinnost zpětného získávání tepla

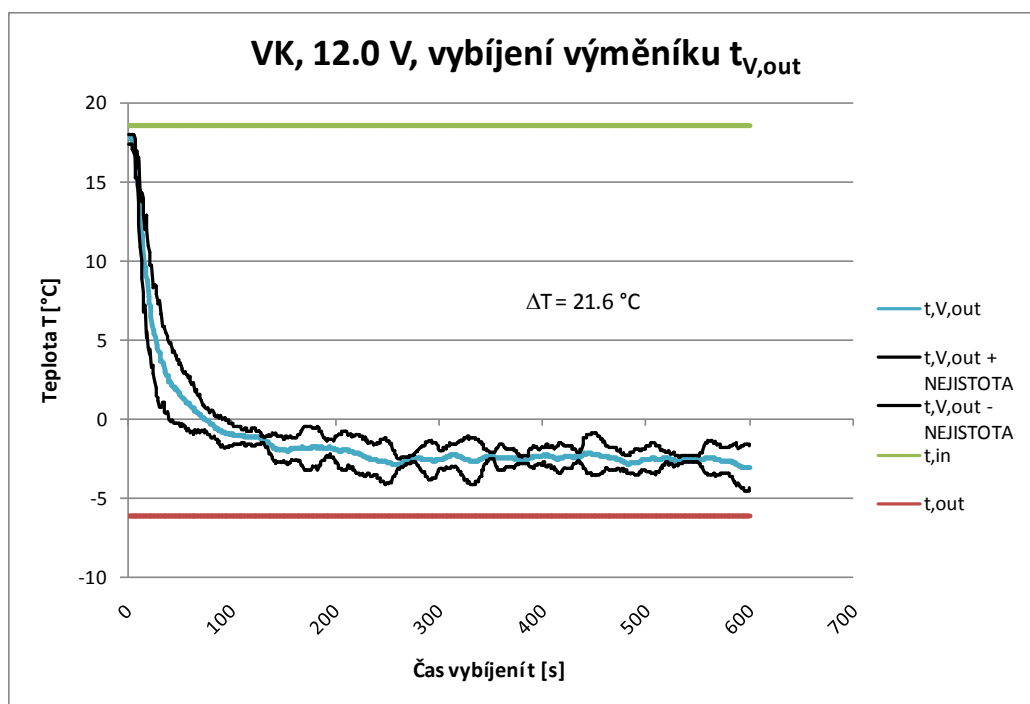
Účinnost ZZT byla stanovena z naměřených křivek cyklického nabíjení a cyklického vybíjení výměníku na základě bilance tepelných toků přes jednotku.



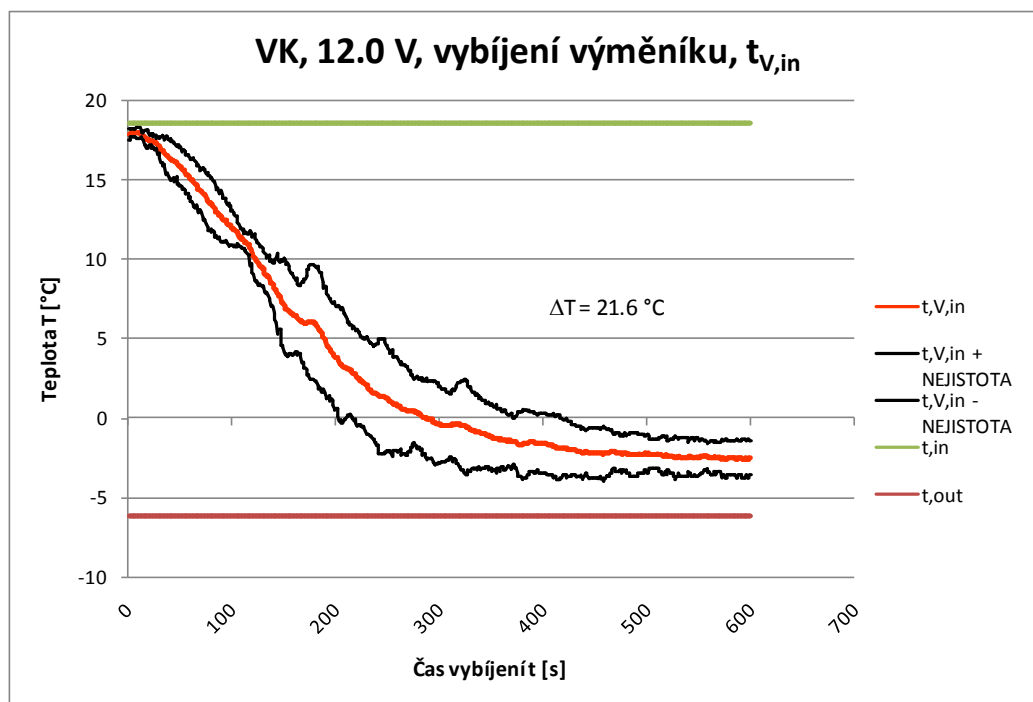
Obr. 2.69: Graf účinnosti v závislosti na rozdílu teplot mezi vnitřním a venkovním prostředím, hodnoty ze sérií měření č. 1 a č. 2

3. Validační křivky pro CFD simulaci

Validační křivky pro CFD simulaci byly stanoveny na základě měření teplot vzduchu na obou okrajích výměníku při ochlazování výměníku ze stavu úplného nabití do stavu úplného vybití. Jde o zjištění odezvy změny parametrů vzduchu vystupujícího z výměníku na změnu parametrů vzduchu do výměníku vstupujícího.



Obr. 2.70: Validační křivka pro režim vybíjení výměníku, teplota před výměníkem $t_{V,out}$; $U = 12,0$ V



Obr. 2.71: Validační křivka pro režim vybíjení výměníku, teplota za výměníkem $t_{V,in}$; $U = 12,0$ V

3 VALIDACE CFD MODELU SYSTÉMU VÝMĚNÍK + VZDUCH

Jedním z cílů práce je provedení parametrické studie vlivu geometrie kanálů výměníku na účinnost systému. Studie byla provedena pomocí CFD simulace, viz obrázek č. 0.1. Aby byla data z CFD simulace co nejbližší chování reálného systému, bylo před samotnou studií třeba validovat CFD výpočtový model. Validace CFD výpočtového modelu byla provedena pomocí dat z měření reálného modelu, viz obrázek 0.2

3.1 Omezení rozsahu simulačních schémat

Validace CFD výpočtového modelu byla provedena pouze pro případ napětí na ventilátorech $U = 12,0$ V. Pro snížená napětí $U = 10,5$ V a $U = 7,2$ V validace provedena nebyla, neboť pro tyto úrovně napětí nebyla spolehlivě stanovena rychlost proudění vzduchu výměníkem (okrajová podmínka), viz tabulky č. 2.9 a č. 2.10 a doprovodný text výše nad tabulkami.

3.2 Tvorba CFD modelu systému

Validační proces sestával z několika základních kroků, viz obr. 3.1. Základem procesu bylo vytvoření CFD modelu systému, sestávajícího se z 3D modelu výměníku a okrajových a počátečních podmínek simulace. Následně proběhla CFD simulace, jejímž výsledkem byl časový průběh teploty vzduchu vystupujícího z výměníku. Tento průběh byl porovnán s časovým průběhem teploty vzduchu vystupujícího z výměníku získaného měřením na reálném modelu jednotky. Pokud byly hodnoty teplot získaných simulací v intervalu nejistot teplot naměřených na reálném modelu, bylo možno simulaci prohlásit za validovanou. V opačném případě bylo upraveno nastavení modelu a výpočet byl opakován.

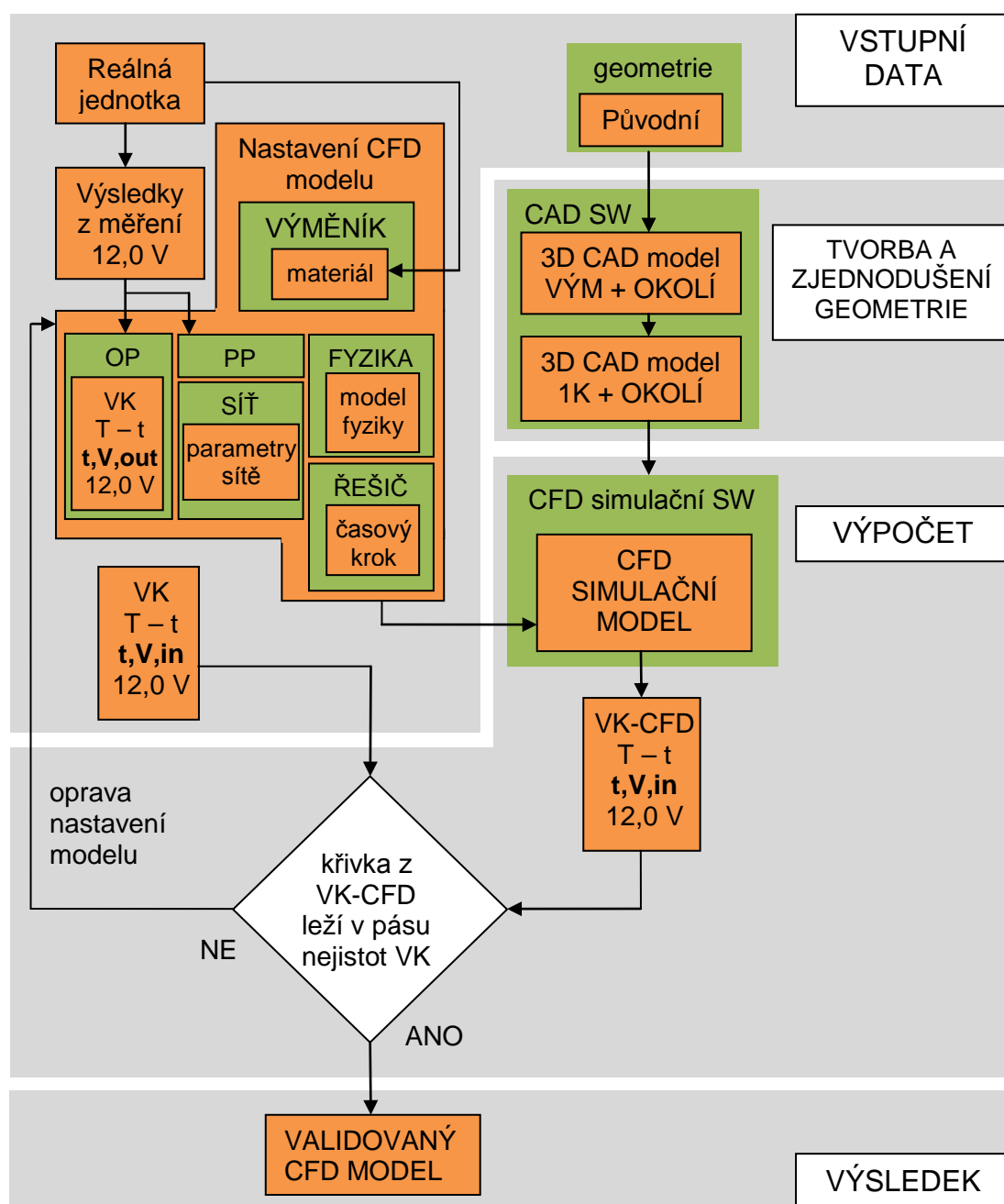
Následující podkapitoly (3.2.1 až 3.2.5) popisují jednotlivé bloky ve schématu postupu na obrázku 3.1.

3.2.1 Počáteční a okrajové podmínky

Počáteční podmínky simulace charakterizovaly stav systému na počátku simulace. Konkrétně šlo o počáteční rychlost vzduchu v simulovaném systému $v_{in,0}$, teplotu výměníku $t_{v,0}$ a teplotu vzduchu v systému $t_{vzd,0}$.

Okrajové podmínky simulace definovaly parametry vzduchu vstupujícího do systému (tzn. nasávaného vzduchu) po čase simulace a fyzikální vlastnosti materiálu výměníku. Všechny uvedené okrajové podmínky byly získány z měření resp. zkoumání fyzického modelu výměníku.

Parametry vzduchu byla rychlost v_{in} a teplota $t_{v,out}$ nasávaného vzduchu. Hodnota rychlosti v_{in} byla převzata z tab. 2.11. Teplota nasávaného vzduchu na vstupu do systému $t_{v,out}$ byla nejprve stanovena jako minimální teplota vzduchu $\text{MIN}\{t_{v,out}\}$, která byla naměřena během nasávání vzduchu (vybíjení výměníku). Později bylo zjištěno, že její průběh není konstantní. Byl tedy převzat její naměřený časový průběh, viz obr. 2.62.



Obr. 3.1: Schéma postupu při validaci CFD modelu

kde

OP	jsou okrajové podmínky
PP	jsou počáteční podmínky
CAD	je Computer aided design, počítačem podporované navrhování
SW	je symbol pro software
VK-CFD	je validační křivka získaná CFD výpočtem

Fyzikálními vlastnostmi materiálu výměníku jsou jeho hustota ρ , nejprve odhadnuta z tabulek materiálových vlastností, viz [8], str. 157, materiál: beton, později vypočítána z naměřené hodnoty hmotnosti výměníku a objemu výměníku, vypočítaného pomocí 3D CAD softwaru,

$$\rho_{\text{vým}} = \frac{m}{V} \quad (3.1)$$

kde $\rho_{\text{vým}} [\text{kg/m}^3]$ je hustota výměníku
 $m [\text{kg}]$ je hmotnost výměníku, $m = 1,455 \text{ kg}$
 $V [\text{m}^3]$ je objem materiálu výměníku, $V = 0,556 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$

dále měrná tepelná kapacita c a měrná tepelná vodivost λ . c a λ byly odhadnuty z tabulek materiálových vlastností, viz [8], str. 157, materiál: beton.

3.2.2 Tvorba 3D CAD modelu systému

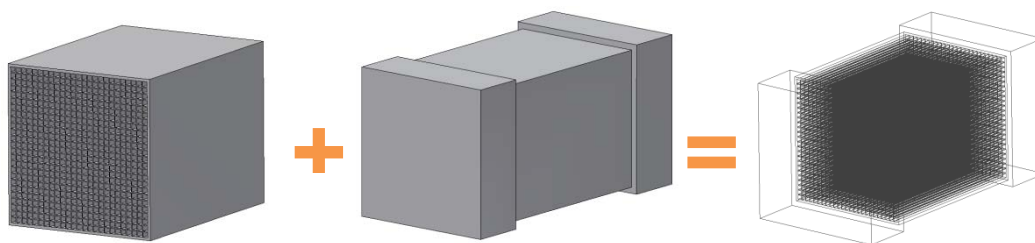
Ke tvorbě trojrozměrného geometrického modelu systému byla použita aplikace Autodesk Inventor, verze 2010.

Nejprve byl vytvořen model výměníku a model okolního vzduchu. Následně byla z těchto dvou součástí vytvořena sestava, viz obr. 3.2.

Model výměníku byl zhotoven s ostrými hranami bez zaoblení. Tento tvar je blízký tvaru fyzického výměníku, který má rovněž hrany na vstupu jen se zanedbatelným zaoblením. Podélné rohy kanálů byly rovněž vymodelovány jako ostré, blízké tvaru zaoblení rohů fyzického výměníku.

Model okolního vzduchu byl vymodelován v návaznosti na tvaru modelu výměníku.

Rozměry modelu výměníku byly zjištěny na základě měření rozměrů na fyzickém modelu výměníku. Délka modelu výměníku je 150 mm a délka vstupního a výstupního úseku vzduchu před resp. za výměníkem byla zvolena 44 mm. Délka 44 mm byla zvolena zcela náhodně a ukázala se jako plně dostačující při zkoumání teplotního pole vzduchu po příčném průřezu proudění vzduchu (ve výstupním úseku vzduchu za výměníkem nebyly zkoumány parametry jako například skalární či vektorové pole rychlostí, které by vyžadovaly pro vytvoření si dostatečné představy o chování vzduchu za výměníkem dlouhý výstupní úsek).



Obr. 3.2: Tvorba 3D CAD modelu systému

3.2.3 Zjednodušení 3D CAD modelu systému pro simulaci

Po vytvoření 3D CAD modelu, vyobrazeného na obrázku 3.2, došlo k jeho následnému převodu do CFD softwaru za účelem provedení simulace (princip převodu z CAD do CFD je uveden v následující podkapitole). Složitost modelu způsobila vytvoření výpočtové sítě s velkým počtem buněk. Velký počet buněk sítě způsobil nárůst doby tvorby sítě a nárůst doby provádění samotného výpočtu průběhu vybíjení výměníku nad únosné meze (tzn. tvorba sítě = cca 4 hodiny, výpočet průběhu vybíjení = cca 10 dní).

Pro omezení doby tvorby sítě i samotného výpočtu vybíjení výměníku bylo přistoupeno ke zjednodušení celého modelu systému:

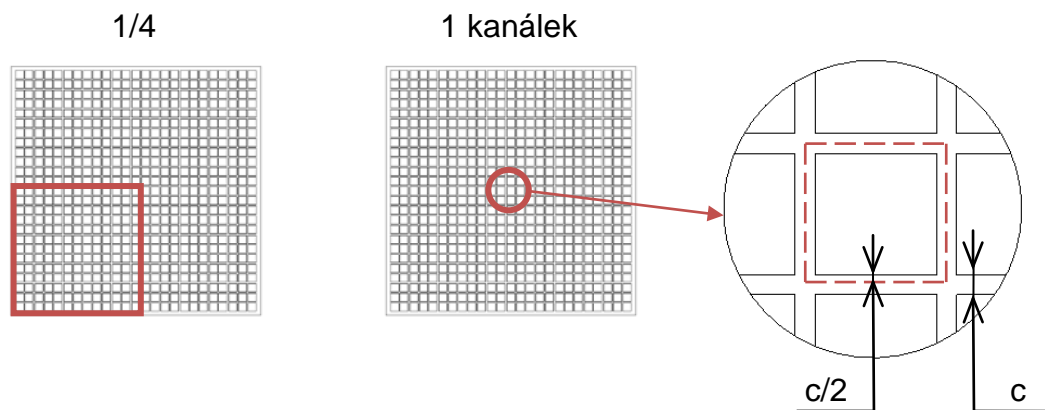
1. *Simulace pouze 1/4 celkového příčného průřezu jednotky*

Po výše uvedeném zjednodušení klesla doba tvorby sítě na cca 1 hodinu. Z důvodu nutnosti rychlé odezvy na úpravu sítě při jejím ladění (po každé změně parametrů sítě bylo nutno síť znovu vytvořit = časová prodleva) bylo přistoupeno k ještě razantnějšímu zjednodušení modelu:

2. *Simulace pouze jednoho kanálu z celkového počtu 25x25 kanálů*

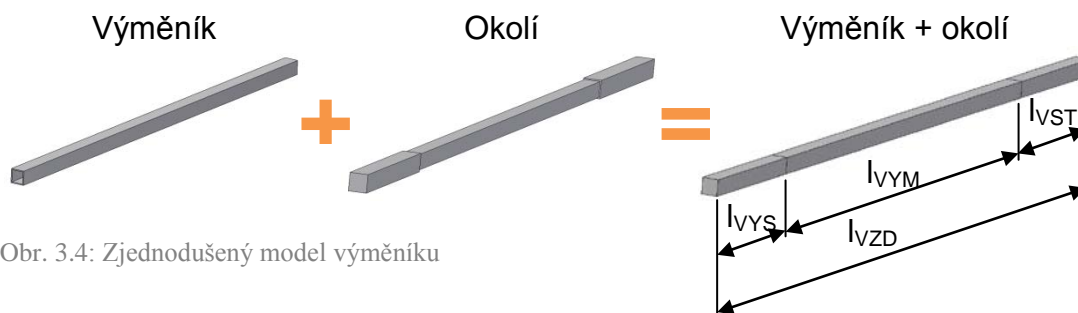
Z celého průřezu byl vybrán kanál ležící přesně uprostřed výměníku. V tomto kanále (a dvou sousedních), viz obr. 2.38, byly vyhodnocovány průběhy teplot vzduchu i při měření reálného modelu. Po zjednodušení klesla doba tvorby sítě na cca 15 minut a doba simulace vybíjení výměníku na cca 3 dny. Zjednodušený model z důvodu zachování symetrie poloviční tloušťku stěny než je tloušťka stěny kanálu, viz obrázek 3.3.

V dalších částech práce bylo pracováno se zjednodušeným modelem skýtající pouze jeden kanálek výměníku a jemu odpovídající část okolního vzduchu.



Obr. 3.3: Zjednodušení modelu výměníku

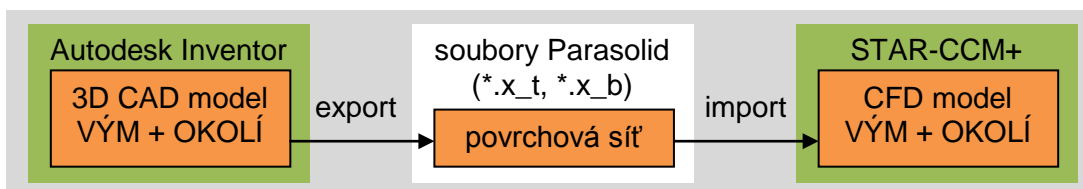
kde	c [m]	je tloušťka stěny kanálu
	$c/2$ [m]	je tloušťka stěny zjednodušeného modelu



Obr. 3.4: Zjednodušený model výměníku

kde l_{VYM} [mm] je délka výměníku, $l_{VYM} = 150$ mm
 l_{VST} [mm] je délka vstupního úseku oblasti se vzduchem, $l_{VST} = 44$ mm
 l_{VYS} [mm] je délka výstupního úseku oblasti se vzduchem, $l_{VYS} = 44$ mm
 l_{VZD} [mm] je délka části se vzduchem

3.2.4 Převod 3D CAD modelu na CFD model



Obr. 3.5: Převod 3D CAD modelu na CFD model

Po dokončení 3D CAD modelu systému VÝMĚNÍK + OKOLÍ v aplikaci Autodesk Inventor byl model exportován jako povrchová síť do souboru typu Parasolid. Soubor typu Parasolid byl následně importován do programu STAR-CCM+, přičemž pro každou plochu byly přiřazeny samostatné okrajové podmínky. Soubor Parasolid je soubor obsahující tzv. „data s neutrálním formátem“ (viz [9]). Soubory dat s neutrálním typem formátu umožňují přenášet informace o CAD modelu mezi různými programy při zachování celistvosti modelu [9].

3.2.5 Tvorba kompletního CFD modelu

CFD simulace byla provedena v aplikaci STAR-CCM+, verze 4.04.011.

K vytvoření funkčního CFD modelu, jehož výstupem je křivka průběhu vybíjení výměníku a přehled o rozložení teplot v proudu vzduchu, bylo třeba uskutečnit následující dílčí kroky:

1. *Nastavení fyzikálních vlastností a okrajových podmínek jednotlivých oblastí*
2. *Tvorba výpočtové sítě*
3. *Iterační výpočet proudění*
4. *Vyhodnocení dat*

Jednotlivé kroky byly rozebrány podrobněji v následujícím textu.

1. *Nastavení fyzikálních vlastností a okrajových podmínek jednotlivých oblastí*

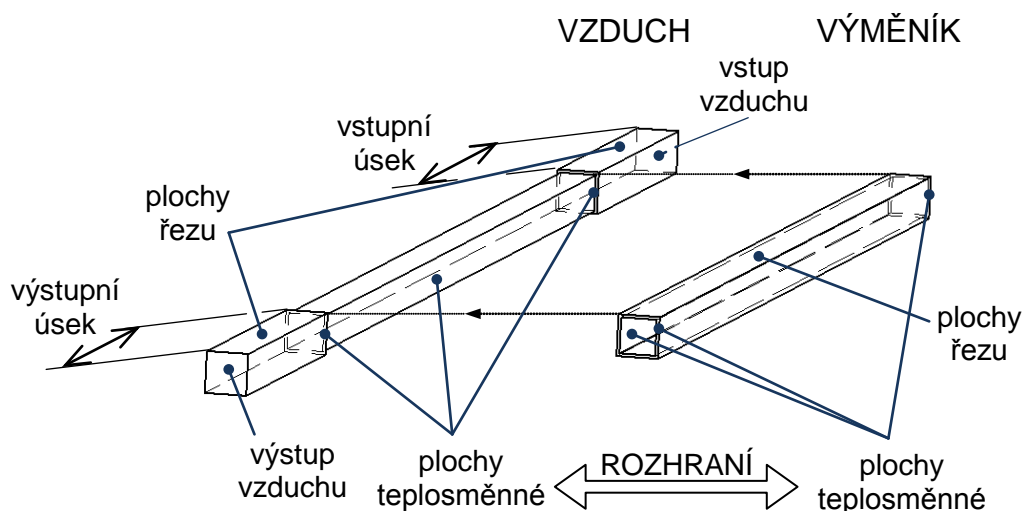
Pozn.: V dalším textu bude doména okolí nazývána jako „vzduch“.

Po importu povrchové sítě modelu, viz kap. 3.2.4, jež se skládá ze dvou domén (výměník + vzduch), byly jednotlivým doménám přiřazeny jejich fyzikální vlastnosti. Doména představující výměník byla nastavena jako „solid“, vlastnosti materiálu byly zadány

z tabulek, viz kap. 3.2.1. Oblast představující okolní vzduch byla nastavena jako „fluid“, vlastnosti vzduchu byly vybrány ze seznamu materiálů v aplikaci STAR-CCM+. Okrajové podmínky na jednotlivých plochách byly nastaveny dle tab. č. 3.1.

okrajová plocha tělesa	typ OP
VÝMĚNÍK	
plochy teplosměnné	wall
plochy řezu	symetry plane
VZDUCH	
plochy teplosměnné	wall
plochy řezu	symetry plane
vstup vzduchu	velocity inlet
výstup vzduchu	pressure outlet
rozhraní VÝMĚNÍK-VZDUCH	
interface	in-place

Tab. 3.1: Přiřazení OP okrajovým plochám tělesa



Obr. 3.6: Rozdělení těles na jednotlivé plochy pro přiřazení OP

Rozbor použitých typů okrajových podmínek:

„Wall“ (stěna) umožňuje přenos tepla přes plochu, na které je definována, v jejím okolí se vytváří prizmatická vrstva (tzn. vrstva, která je v okolí plochy, na které je OP definována vytvořena, jemnější).

„Symetry plane“ (symetrická okrajová podmínka) neumožňuje přenos tepla přes plochu, na které je definována a při tvorbě sítě se na této ploše nevytváří prizmatická vrstva buněk.

„Velocity inlet“ je OP umožňující definovat parametry tekutiny vstupující do oblasti (tzn. do prostředí např. vzduchu, ve kterém je prováděna simulace) přes plochu, na které je tato OP definována. Parametry tekutiny mohou být vstupní rychlost, teplota atd.

„Pressure outlet“ je OP umožňující definovat přetlak (podtlak) vzduchu na výstupu z oblasti vůči tlaku vzduchu za oblastí, ve které probíhá simulace. V případě systému výměník + okolí byl na výstupu zadán přetlak $p_{\text{přetl}} = 0$ Pa (rovnotlaký systém).

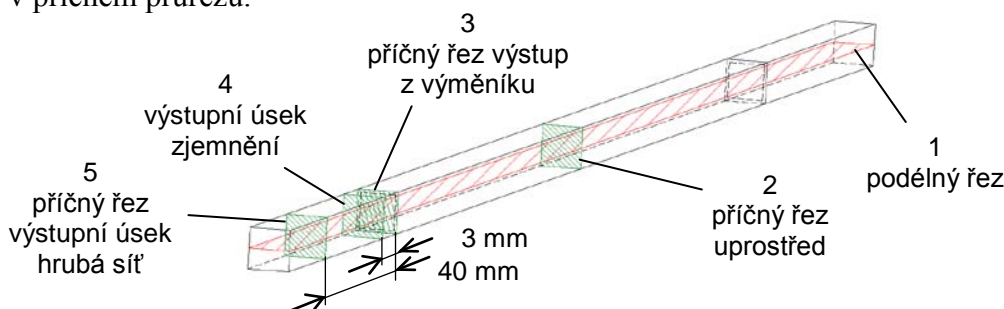
„Interface“ je OP povolující přenos hmoty a tepla mezi dvěma oblastmi [9], v případě systému vzduch + okolí přenos tepla z výměníku do proudícího vzduchu.

2. Tvorba výpočtové sítě

Výpočtová síť rozdělí objem dané oblasti (těleso výměníku, vzduchu) na jednotlivé výpočetní objemy, které se nazývají buňky. Každá část se nazývá buňka. V objemu každé buňky jsou vypočítané parametry média (pevné, kapalné, plynné) konstantní (ovšem pouze po dobu jedné iterace). Čím je tedy síť jemnější, tím si lze vytvořit přesnější představu o dějích v simulované oblasti. S nárůstem počtu buněk síť ale roste i výpočetní a časová náročnost k vytvoření sítě i řešení samotného problému.

Před samotným vytvářením sítě byla oblast „vzduch“ rozdělena na tři části – vstupní část; část, ve které dochází k přenosu tepla z výměníku do proudícího vzduchu; a na výstupní část. Ve druhé zmiňované části bylo třeba vytvořit síť jemnější než v ostatních částech (intenzivní přenos tepla z oblasti výměníku do oblasti vzduchu). Oblast pevného tělesa – výměníku byla vytvořena z jednotné velikosti buněk v celé jeho oblasti.

Pro vytvoření sítě byl zvolen hexahedrální tvar buněk (šestistěny) s izotropickým a anizotropickým dělením. Izotropická síť buněk byla použita pouze ve vstupním a výstupním úseku v oblasti vzduchu. Anizotropická síť byla použita v prostředním úseku oblasti vzduchu a v oblasti výměníku. Anizotropické buňky měly v příčném průřezu tvar rovnostranného čtverce, viz obr. 3.11 a v podélném průřezu, viz obr. 3.10, měly velikost přibližně desetinásobku velikosti strany jejich základny v příčném průřezu.

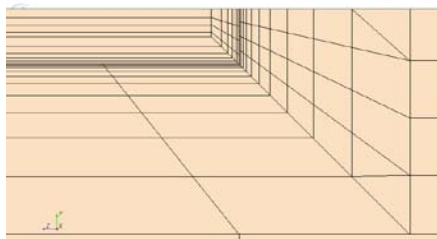


Obr. 3.7: Schéma ploch, na kterých bylo prováděno vyhodnocení veličin

Na obr. 3.9, obr. 3.10 a obr. 3.11 je vidět růst prizmatických buněk z rozhraní výměník-vzduch do oblasti se vzduchem i do oblasti s výměníkem. Důvodem použití prizmatické vrstvy je postihnoutí velkého teplotního gradientu v oblasti rozhraní a tím zpřesnění výpočtu.



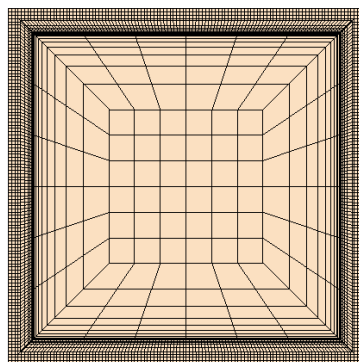
Obr. 3.8: Výpočtová síť, podélný řez (1)



Obr. 3.9: Výpočtová síť, podélný řez (1), detail



Obr. 3.10: Výpočtová síť, podélný řez (1), detail vstupu do výměníku



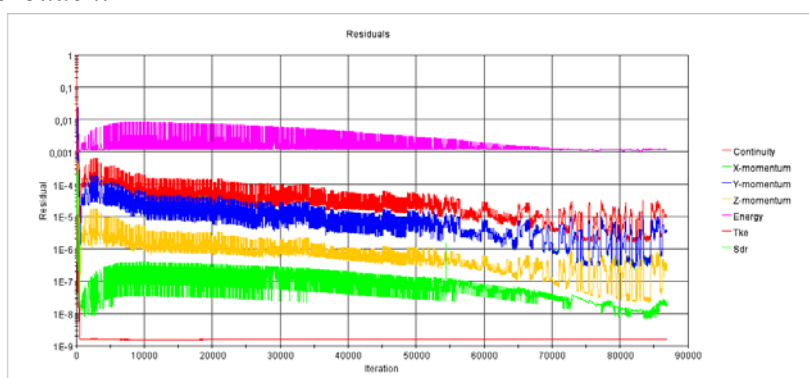
Obr. 3.11: Výpočtová síť, příčný řez uprostřed (2)

3. Iterační výpočet proudění

Po nastavení OP a PP bylo přistoupeno k iteračnímu výpočtu proudění. Před spuštěním výpočtu bylo třeba najít způsob záznamu sledovaných dat.

Sledovanými daty byl časový průběh

teploty vzduchu vystupujícího z výměníku. Byly vytvořeny plochy umístěné v příčném průřezu modelu (viz obr. 3.7), na plochách byla sledována průměrná teplota vzduchu po této ploše. Dále byl nastaven časový krok simulace (jednalo se o transientní úlohu = proměnnou v čase) a kritéria pro velikost reziduí. Všechna kritéria reziduí kromě jednoho byla nastavena na hodnotu 10^{-4} . Reziduum energie bylo nastaveno na hodnotu přibližně $13 \cdot 10^{-3}$. Na obrázku 3.12 je vidět typický průběh reziduí během simulací.



Obr. 3.12: Typický průběh reziduí během simulací

docházelo k postupnému poklesu průměrné hodnoty reziduí. Pokles po prvotním ustálení byl zapříčiněn stále pomalejší změnou teploty vzduchu vstupujícího do výměníku, kdy se teplota v čase simulace $t = (300 \text{ až } 600) \text{ s}$ téměř neměnila, viz obr. 2.62.

4. Vyhodnocení dat

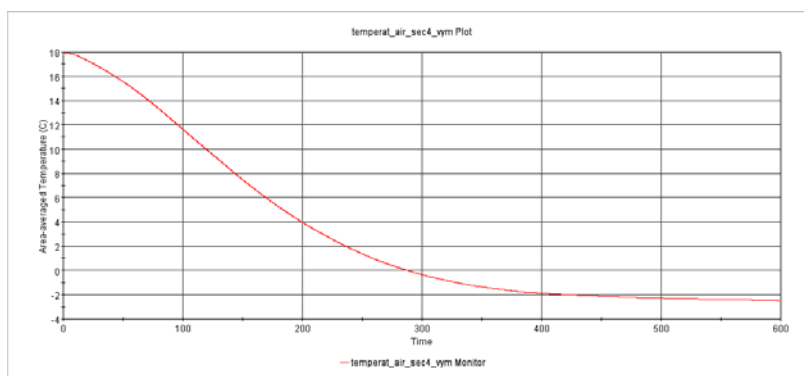
Teplota vzduchu vystupujícího z výměníku byla vyhodnocována jako průměrná hodnota z teplot vzduchu na ploše č. 3 a ploše č. 4, viz obr. 3.7.

Poznámka 3.1: Chybné vyhodnocení průměrné teploty vzduchu vystupujícího z výměníku, vyhodnocované z plochy č. 3

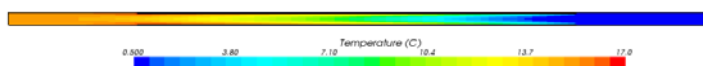
Při ladění CFD modelu (viz kap. 3.3) došlo k chybné metodice vyhodnocování teploty vzduchu vystupujícího z výměníku z plochy č. 3 (viz obr. 3.7). Při porovnání průběhu stejné teploty z plochy č. 3 a z plochy č. 4 bylo zjištěno, že průměrná teplota z plochy č. 3 je o cca 1°C vyšší než průměrná teplota z plochy č. 4. Rozdíl byl dán umístěním plochy č. 3 na výstupním konci výměníku. Do výpočtu průměrné teploty vzduchu na výstupu z výměníku poté vstupovala ještě teplota výměníku. Výsledek byl tímto ovlivněn. Řešením bylo vytvoření nové plochy pro sledování průběhu teplot ve vzdálenosti 3 mm za výměníkem. Plocha nese označení „4, výstupní úsek, zjemnění“, viz obr. 3.7. Posunutím plochy došlo k zachycení teploty vzduchu vystupujícího z výměníku s časovým zpožděním, které je však vzhledem k rychlosti proudění vzduchu v systému (cca 1.5 m/s) zanedbatelné.

Průměrná hodnota teploty vystupujícího z výměníku byla v pravidelných časových krocích monitorována a zapisována do grafu. Po ukončení simulace byla data

z grafu exportována a dále upravována v aplikaci MS Excel.

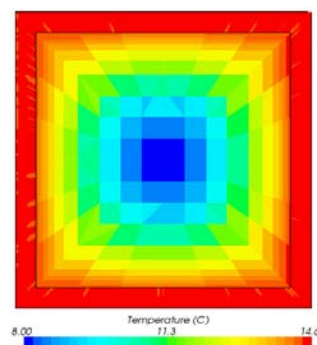


Obr. 3.13: Graf průměrné teploty vystupující z výměníku, hodnoty z měřicí plochy č. 4



Obr. 3.14: Vizualizace rozložení teplot po délce modelu, řez č. 1, čas simulace $t = 66 \text{ s}$

Obr. 3.15: Vizualizace rozložení teplot po průřezu systému, řez č. 2, čas simulace $t = 66 \text{ s}$



3.3 Ladění CFD modelu

3.3.1 Kritérium pro validovaný výpočtový model

Pro prohlášení simulace za validovanou bylo třeba stanovit kritérium:

Jestliže je časový průběh hodnot průměrné teploty vzduchu vystupujícího z výměníku získaný simulací v intervalu nejistot časového průběhu teplot naměřených na reálném (fyzickém) modelu výměníku, simulaci je možno prohlásit na validovanou. V opačném případě je třeba upravit nastavení celého CFD modelu a výpočet opakovat.

Po splnění tohoto kritéria bylo možno přistoupit k parametrické studii vlivu geometrie výměníku na účinnost ZZT jednotky, viz kapitola č. 4.

3.3.2 Průběh ladění

Ladění CFD modelu sestávalo z postupné změny parametrů jednotlivých okrajových podmínek, viz tab. 3.2. Validace sestávala ze sedmi simulací, z nichž validace V7 byla prohlášena za konečnou a model byl prohlášen za validovaný.

Pozn. k tab. 3.2: Každá změna parametrů je pro větší přehlednost vyznačena světle oranžovou barvou buňky tabulky.

Do první simulace byla do OP „vstup vzduchu“ (viz tab. 3.1 a obr. 3.6) dosazena rychlost proudění vzduchu v kanálu (později vyšlo najevo, že namísto chybně dosazené rychlosti proudění v kanálu měla být dosazena rychlost proudění vzduchu ve vstupním úseku, viz poznámka č. 3.2). Vlastnosti materiálu výměníku byly nejprve odhadnuty, později byly upraveny – konkrétně hustota materiálu, viz kap. 3.2.1. Validace V5 a V6 se od sebe navzájem liší pouze délkou časového kroku řešení, z obr. 3.18 je patrné, že změna délky kroku v uvedeném rozsahu měla na výsledný průběh sledovaných parametrů vzduchu zanedbatelný vliv (v obr. 3.17 není křivka pro V5 vůbec viditelná, kopíruje téměř přesně křivku V6). V dalších výpočtech tak byla délka časového kroku řešení nastavena vždy na hodnotu 0,020 s.

Tab. 3.2: Přehled změny parametrů při ladění CFD modelu

podmínky SIMULACE:													
č. vali dace	OP		PP (t=0s)			materiál výměníku				časový krok		report z plochy č.	
	rychl.	t nasáv	rychl.	t výměník	t vzduch					čas vybití t			time step
	v _{in}	t _{V,out}	v _{in,0}	t _{V,0}	t _{vzd,0}	název	ρ	c	λ	od	do		s
	m/s	°C	m/s	°C	°C		kg/m ³	J/kg/K	W/m/K	s	s	s	-
V1	1.54	-3	0	18.6	-3	keram	2300	1130	1.28	-	-	0.005	3
V2	0.80	-3	0	18.6	-3	keram	2300	1130	1.28	-	-	0.005	3
V3	1.54	T-t t _{V,out}	1.53	17.9	17.7	keram	2615.1	1130	1.28	0	24.725	0.005	3
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24.725	60.855	0.010	3
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	70.505	-	0.020	3
V4	0.60	T-t t _{V,out}	0.6	17.9	17.7	keram	2615.1	1130	1.28	0	66.1	0.005	3
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	66.1	240.3	0.010	3
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	240.3	600	0.020	3
V5	0.80	T-t t _{V,out}	0.8	17.9	17.7	keram	2615.1	1130	1.28	0	232.28	0.005	3
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	232.28	317.26	0.010	3
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	317.26	600	0.015	3
V6	0.80	T-t t _{V,out}	0.8	17.9	17.7	keram	2615.1	1130	1.28	-	-	0.020	3
V6(s4)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4
V7	0.75	T-t t _{V,out}	0.75	17.9	17.7	keram	2615.1	1130	1.28	-	-	0.020	4

kde	v_{in} [m/s]	je rychlost proudění vzduchu na vstupu do oblasti vzduchu
	$v_{in,0}$ [m/s]	je rychlost proudění vzduchu na vstupu do oblasti vzduchu na počátku simulace
	$t_{v,0}$ [°C]	je teplota výměníku na počátku simulace
	$t_{vzd,0}$ [°C]	je teplota vzduchu v celém systému na počátku simulace
	keram	je symbol pro název materiálu „keramika“
	c [J/kg/K]	je měrná tepelná kapacita materiálu výměníku
	λ [W/m/K]	je tepelná vodivost
	„time step“	je symbol pro časový krok simulace

Poznámka 3.2: Oprava chyby ve výpočtu rychlosti proudění v kanálu

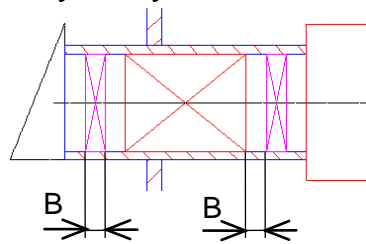
V průběhu ladění simulace byla nalezena chyba při zadávání hodnoty rychlosti proudění vzduchu na okrajové podmínce „vstup vzduchu“ (viz tab. 3.1). Namísto rychlosti ve vstupním úseku $v_{vst,12,0V,vyb} = 1,14$ m/s (viz tab. 2.11) byla do výše zmiňované OP vložena rychlost proudění vzduchu v kanálu $v_{1k,12,0V} = 1,53$ m/s. Výše uvedená chyba vedla pouze k prodloužení doby nalezení optimálních parametrů rychlosti na vstupu do oblasti vzduchu (viz poznámka 3.3), na přesnost validovaného modelu uvedená chyba neměla vliv.

Poznámka 3.3: Závislost rychlosti proudění vzduchu v kanálu výměníku na poloze kanálu v celkovém příčném průřezu výměníku

Byl vytvořen předpoklad, že rychlost proudění vzduchu je ve všech kanálech výměníku přibližně stejná, mírně vyšší uprostřed průřezu výměníku. Po provedení několika simulací se zjednodušeným simulačním modelem, kdy jeden kanál leží uprostřed průřezu výměníku (viz obr. 3.3) bylo zjištěno, že rychlost proudění v kanálu je nižší než myšlená průměrná hodnota rychlosti společná pro všechny kanály.

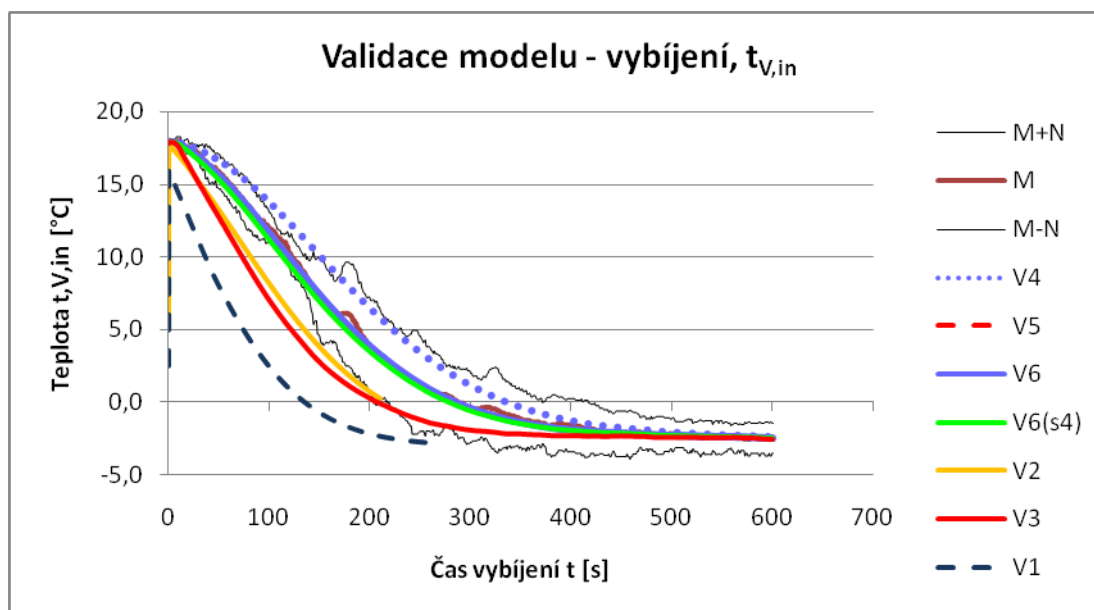
Jako možné **příčiny** lze považovat kombinaci následujících dvou faktorů:

1. V průtočném průřezu kanálu fyzického modelu výměníku byl při měření umístěn termočlánek, který zvýšil celkovou tlakovou ztrátu kanálu proti proudění vzduchu. Rychlost proudění vzduchu pak byla v tomto kanále nižší než průměrná hodnota rychlosti proudění přes všechny kanály.
2. Geometrický tvar ventilátorů. Motor použitých axiálních ventilátorů je umístěn uprostřed průtočného průřezu výměníku a lopatky jsou na okrajích (viz obr. 2.33). Lopatky umístěné na okrajích ventilátorů způsobovaly vyšší celkový tlak vzduchu v okrajových částech příčného průřezu výměníku a následné vyšší rychlost proudění v těchto částech. Doposud byl objasněn vliv ventilátoru vhánějícího vzduch do výměníku (tzn. umístěného před výměníkem). Ventilátor umístěný za výměníkem (ač se neotáčel), rovněž svým geometrickým tvarem ovlivňoval pole rychlostí v příčném průřezu výměníku. Ke snížení vlivu geometrického tvaru ventilátorů byla mezi výměníkem a oběma ventilátory ponechána mezera o velikosti šířky ventilátoru B , viz obr. 3.16. Cílem bylo dosažení



Obr. 3.16: Šířka ventilátoru

alespoň částečného vyrovnání celkových tlaků proudícího vzduchu po příčném průřezu výměníku a tím snížení vlivu geometrie ventilátorů.



Obr. 3.17: Průběh validace CFD modelu systému

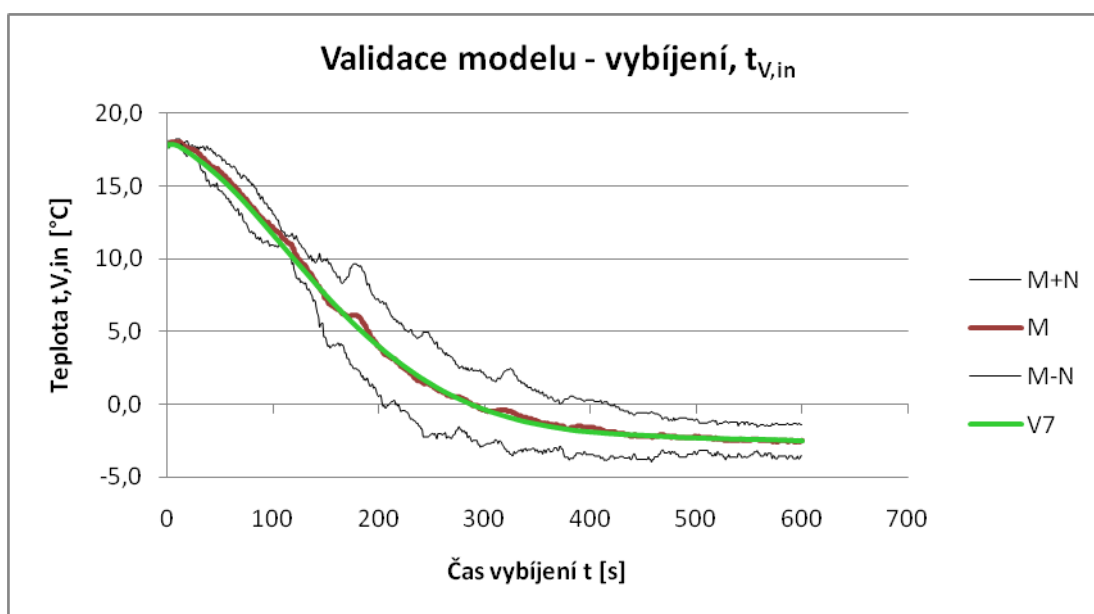
kde M je symbol pro označení teploty získané měřením na fyzickém modelu výměníku (dále v popisích grafu jen: naměřená teplota)
M+N je symbol pro naměřenou teplotu s přičtenou nejistotou měření
M-N je symbol pro naměřenou teplotu s odečtenou nejistotou měření

3.4 Validovaný CFD model systému výměník + okolní vzduch

Cílem validace modelu bylo nalezení nastavení parametrů okrajových podmínek (při zachování reálných fyzikálních hodnot), počátečních podmínek, parametrů výpočtové sítě, modelů fyziky, materiálových vlastností výměníku a parametrů řešiče, při kterých bude chování CFD modelu systému vzduch-výměník velmi blízké chování reálného fyzického modelu uvedeného systému.

Po několika změnách parametrů nastavení CFD modelu při jeho validaci byly nalezeny hodnoty parametrů takové, při kterých sledovaná teplota vzduchu vystupujícího z výměníku při jeho vybíjení ze stavu plného nabití do stavu úplného vybití získaná simulací je velmi blízká uvedené teplotě, ovšem získané z měření na reálném fyzickém modelu.

Získaný průběh výstupní teploty pomocí simulace (viz obr. 3.18 - křivka „V7“) je v pásu nejistot měření teplot na reálném modelu (viz obr. 3.18 – křivky M+N, M a M-N) a navíc kopíruje průběh naměřené teploty jen s velmi malými odchylkami. CFD model splňuje kritérium pro validovaný model (viz kap. 3.3.1) a je možno jej považovat za validovaný.



Obr. 3.18: Křivka průběhu teploty za výměníkem (tzn. na vnitřní straně výměníku) získaného z validovaného CFD modelu

Přesné hodnoty parametrů validovaného modelu jsou uvedeny v tabulce č. 3.3.

Tab. 3.3: Parametry validovaného CFD modelu

VALIDOVANÝ CFD MODEL - podmínky SIMULACE:													
č. vali dace	OP		PP (t=0s)			materiál výměníku				časový krok			report z plochy č.
	rychl.	t nasáv	rychl.	t výměník	t vzduch	název	ρ	c	λ	čas vybíjení t		time step	
	v_{in}	$t_{V,out}$	$v_{in,0}$	$t_{V,0}$	$t_{vzd,0}$					od	do	s	
	m/s	°C	m/s	°C	°C		kg/m ³	J/kg/K	W/m/K	s	s	s	-
V7	0.75	T-t $t_{V,out}$	0.75	17.9	17.7	keram	2615.1	1130	1.28	-	-	0.020	4

4 PARAMETRICKÁ STUDIE VLIVU GEOMETRICKÉHO TVARU KANÁLŮ NA ÚČINNOST SYSTÉMU

Kapitola se zabývá vlivem různých tvarů kanálů výměníku na přestup tepla z hmoty výměníku do vzduchu proudícího skrz výměník.

4.1 Omezení rozsahu studie

Zkoumání vlivu geometrického tvaru kanálů výměníku na účinnost bylo provedeno pouze částečně. Ke zjištění účinnosti by bylo třeba pro každou variantu tvaru geometrie výměníku provést simulaci několika nabíjecích a vybíjecích cyklů, což by velmi prodloužilo čas potřebný k provedení simulace. Proto byly provedeny pouze simulace vybíjení výměníku ze stavu plného nabití (z teploty výměníku rovné teplotě vzduchu uvnitř místnosti) do stavu úplného vybití (na minimální teplotu vzduchu, který výměníkem může proudit, viz poznámka 2.16).

4.2 Parametry ovlivňující účinnost ZZT

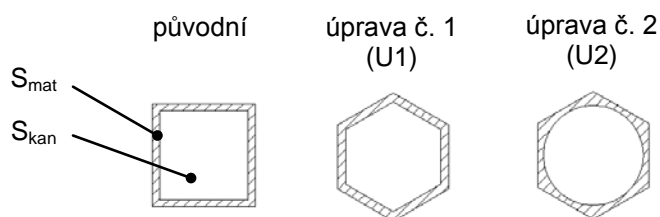
Tab. 4.1: Parametry ovlivňující účinnost ZZT

	parametr	konstanta pro simulaci
1	hmotnostní průtok vzduchu (napětí)	ano
2	průtočný průřez kanálu - velikost	ano
3	průtočný průřez kanálu - tvar	NE
4	tloušťka stěny	NE
5	hmotnost stěny	ano
6	teplota vzduchu	ano
7	vlhkost vzduchu	ano
8	teplota výměníku	ano
9	materiál výměníku	ano
10	drsnot povrchu kanálu	ano
11	délka kanálu	ano
12	poloha kanálu ve výměníku	ano
13	délka periody reverzace	ano

Tabulka 4.1 ukazuje, které parametry byly při studii měněny a které byly pevně zadány.

Při změně tvaru průtočného průřezu kanálu byla zachována velikost celkové plochy kanálu (celková plocha kanálu = průtočná plocha + plocha materiálu výměníku). Jelikož bylo třeba kanály s modifikovanými tvary průtočných průřezů vhodným způsobem umístit do průřezu celého výměníku, došlo přitom k malé změně velikosti hmoty materiálu výměníku mezi jednotlivými kanály. Tvary původního průtočného průřezu výměníku a modifikované tvary jsou vyobrazeny na obrázku 4.1. Velikosti průtočných ploch a hmotnosti materiálu výměníku pro jednotlivé modifikace jsou uvedeny v tabulce 4.2.

4.3 Tvary jednotlivých modifikací průtočného průřezu výměníku



Obr. 4.1: Původní a modifikované tvary kanálů

kde $S_{\text{mat}} [\text{mm}^2]$ je velikost plochy materiálu výměníku připadající na jeden kanál
 $S_{\text{kan}} [\text{mm}^2]$ je velikost plochy průtočného průřezu kanálu

Tab. 4.2: Parametry jednotlivých modifikací tvaru kanálů

		původní	úprava č. 1	úprava č. 2
S_{mat}	mm^2	4,814	4,938	4,855
S_{kan}	mm^2	13,78	13,78	13,78
m_{mat}	g	1,888	1,937	1,904
Δm_{mat}	%	0	+ 2,54	+ 0,79

kde $m_{\text{mat}} [\text{g}]$ je hmotnost materiálu výměníku připadající na velikost jednoho kanálu
 $\Delta m_{\text{mat}} [\%]$ je procentuelní nárůst hmoty připadající na jeden výměník při provedení modifikace

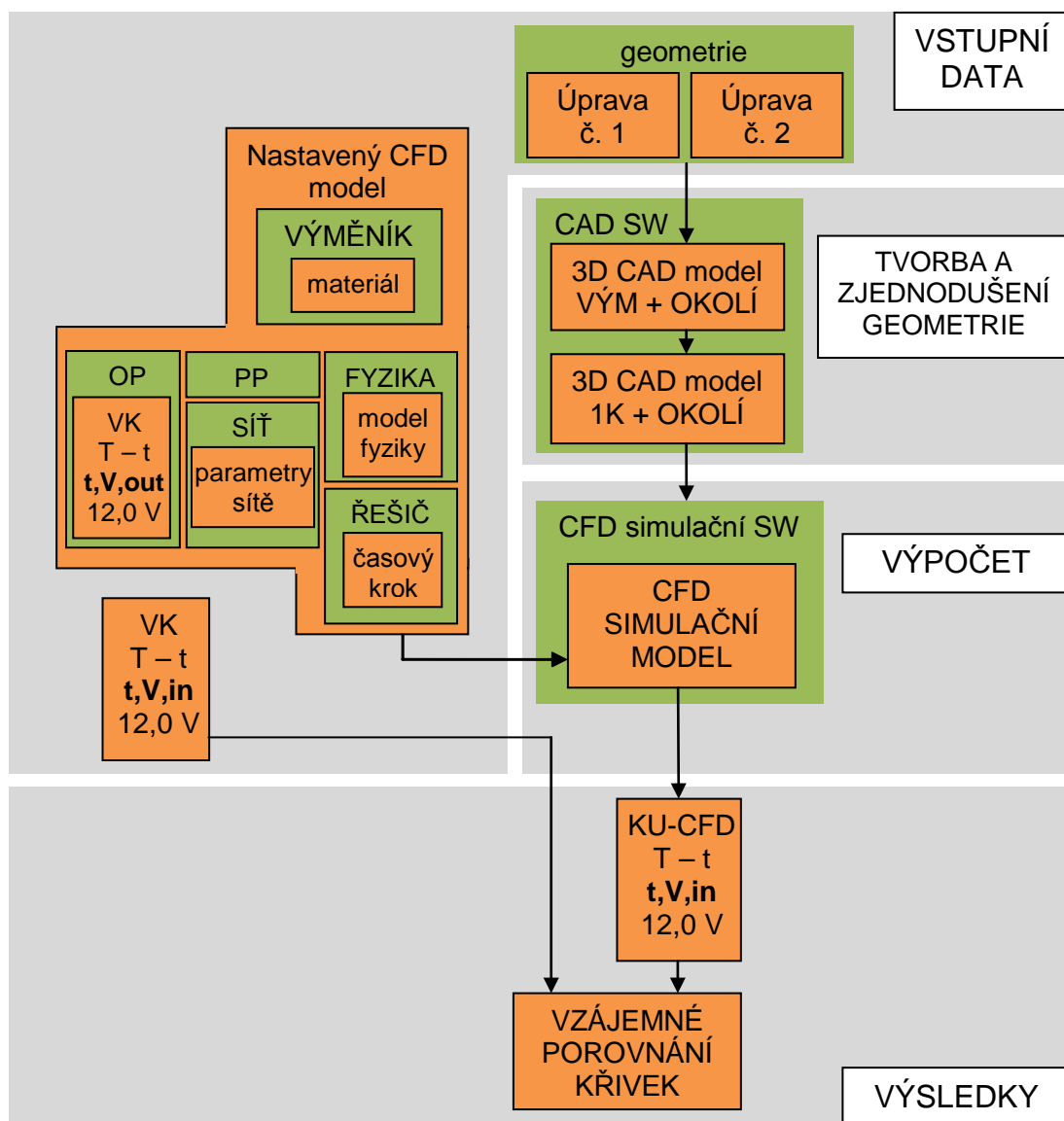
Hmotnost materiálu výměníku byla vypočtena podle následujícího vztahu:

$$m_{\text{mat}} = \rho_{\text{vým}} \cdot V_{\text{mat}} = \rho_{\text{vým}} \cdot S_{\text{mat}} \cdot l_{\text{VYM}} \quad (4.1)$$

kde $V_{\text{mat}} [\text{mm}^3]$ je objem materiálu výměníku připadající na velikost jednoho kanálu

4.4 Metodika provedení studie vybraných tvarů kanálů

Studie byla provedena na validovaném CFD simulačním modelu. Do validovaného simulačního modelu byly postupně vkládány nové geometrické modely výměníku. Ostatní parametry CFD modelu zůstaly nezměněny. Po proběhnutí všech simulací byla výsledná data, konkrétně křivky časového průběhu teplot vzduchu vystupujícího z výměníku, vynesena do grafu a porovnána s křivkou časového průběhu teploty vzduchu vystupujícího z výměníku získanou měřením na reálném fyzickém modelu, viz obr. 2.63. Metodika postupu při studii je vyobrazena na obr. 4.2.



Obr. 4.2: Schéma postupu při parametrické studii

kde KU-CFD

je křivka průběhu teploty vzduchu za výměníkem pro upravenou geometrii

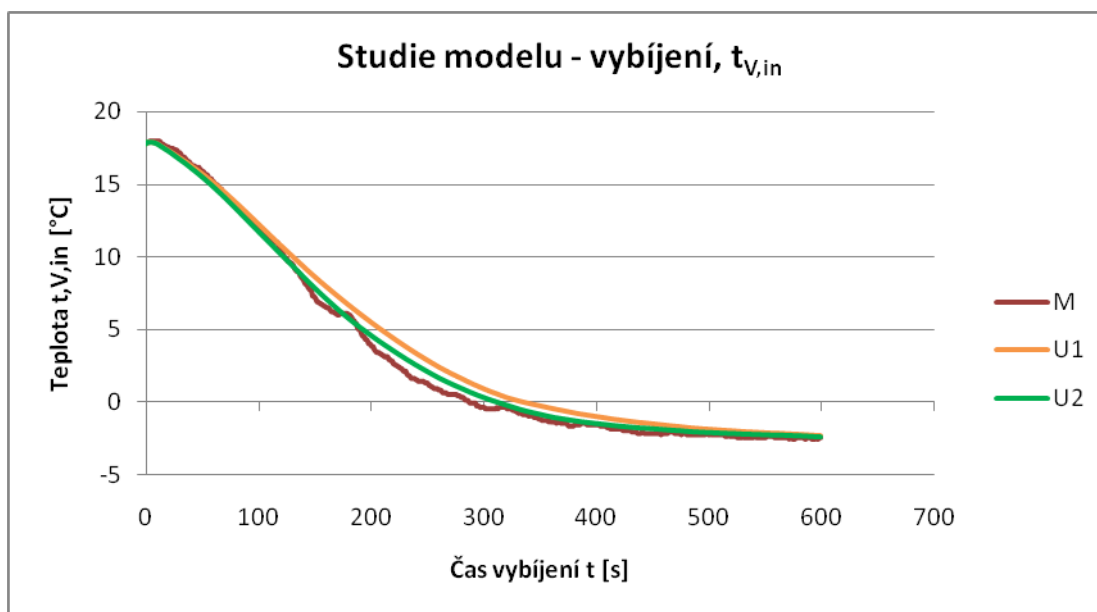
4.5 Vyhodnocení výsledků studie

Po vynesení dat ze simulací do grafu a po jejich vzájemném srovnání, viz obr. 4.3 lze vyvodit následující závěry:

Z vyhodnocených dat nelze určit účinnost výměníku. Simulace by musela být provedena pro režim cyklického nabíjení a vybíjení, z důvodu velké časové náročnosti však pro tento režim provedena nebyla (viz také v kap. 4.1). Byl proveden alespoň odhad vlivu poměru objemu materiálu výměníku k objemu kanálů výměníku na účinnost výměníku, viz kap. 4.6.

Vliv změny tvaru průtočného průřezu určit rovněž nelze, neboť výsledné hodnoty jsou ovlivněny změnou velikosti hmoty výměníku pro jednotlivé modifikace tvaru výměníku (viz tab. 4.2). Vliv navýšení hmoty výměníku je popsán dále v textu.

Navýšení hmoty materiálu výměníku u jednotlivých modifikací způsobilo nárůst tepelné kapacity výměníku, což lze pozorovat na obrázku č. 4.3. Podrobnější vysvětlení podává obrázek 4.4.

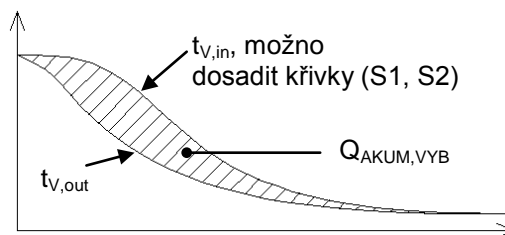


Obr. 4.3: Křivka průběhu teploty za výměníkem (tzn. na vnitřní straně výměníku) pro modifikované tvary kanálů výměníku, získané z validovaného CFD modelu

Tab. 4.3: Parametry validovaného CFD modelu

podmínky SIMULACE:														
č. studie	č. úpravy tvaru geometrie	OP		PP (t=0s)			materiál				časový krok			report z plochy č.
		rychl.	t nasáv	rychl.	t výměník	t vzduch	název	ρ	c	lambda	čas vybíjení t		time step	
		v,in	t,V,out	v,in,0	t,V,0	t,vzd,0					od	do		
		m/s	°C	m/s	°C	°C					s	s		
U1	1	0.75	T-t t,V,out	0.75	17.9	17.7	keram	2615	1130	1.28	-	-	0.02	4
U2	2	0.75	T-t t,V,out	0.75	17.9	17.7	keram	2615	1130	1.28	-	-	0.02	4

Na obrázku 4.4 lze vidět kvalitativní způsob vyhodnocení uvolněného tepla z výměníku $Q_{AKUM,VYB}$ (viz také obr. 2.50). Do výměníku vstupuje vzduch o teplotě $t_{V,out}$, viz obr. 2.62. Namísto křivky $t_{V,in}$ je možno dosadit průběh teplot z měření reálného fyzického modelu nebo jeden z průběhů teplot získaných simulací.



Obr. 4.4: Kvantitativní způsob vyhodnocení uvolněného tepla z výměníku

4.5 Odhad vlivu poměru plochy materiálu výměníku a plochy kanálů výměníku v příčném průřezu přes výměník na účinnost

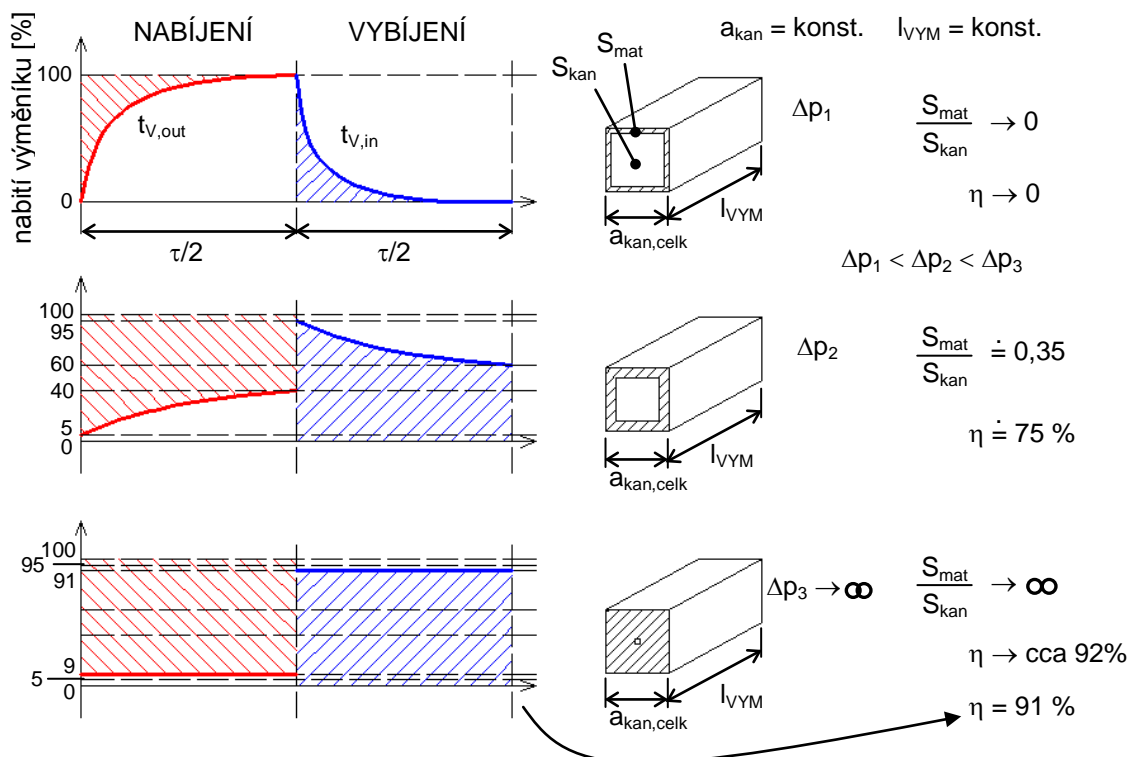
Kapitola se zabývá odhadem vlivu poměru plochy materiálu výměníku k ploše kanálů výměníku v příčném průřezu výměníku na účinnost zpětného získávání tepla výměníku pro **čtvercový** průřez výměníku. Odhad byl proveden na základě zkušeností získaných při tvorbě práce a částečně i z dat naměřených na reálném modelu výměníku. Grafické znázornění odhadu je uvedeno na obrázku č. 4.5. V následujícím textu bude hovořeno o ploše v **příčném průřezu** výměníku pouze jako o ploše (jde o zkrácení použitého výrazu pro zprehlednění textu).

Odhad zní:

Bude-li se měnit poměr plochy materiálu výměníku k ploše průtočné, bude se měnit i účinnost systému. Předpokladem je konstantní délka výměníku l_{VYM} , konstantní celková délka strany kanálu $a_{kan,celk}$, konstantní parametry venkovního a vnitřního vzduchu, konstantní délka periody $\tau/2$ (pro prostřední případ v obr. 4.5 byla $\tau/2 = 70$ s) a konstantní parametry uvedené v tabulce č. 4.1 a to konkrétně parametry číslo: 1, 3, 9, 10, 12. Naopak při změně poměru průřezů se bude měnit tlaková ztráta výměníku.

Dále je z odhadu průběhů teplot vystupujících z výměníku vidět při zvětšování tloušťky stěny výměníku zvětšování účinnosti. Účinnost se bude zvětšovat pravděpodobně jen do určité její limitní hodnoty (na obr č. 4.5 je odhadována hodnota okolo 92 %). Nevýhodou zvětšování podílu průřezu materiálu vůči průtočnému průřezu vzduchu je zvětšování tlakové ztráty výměníku Δp .

Uvedený odhad je možno v budoucnosti ověřit dvěma způsoby: výrobou fyzického modelu výměníku a následným měřením nebo CFD simulací pomocí validovaného CFD modelu.



Obr. 4.5: Odhad vlivu poměru plochy materiálu výměníku a plochy kanálů výměníku v příčném průřezu přes výměník na účinnost

kde Δp [Pa] je tlaková ztráta výměníku
 $a_{kan,celk}$ [mm] je celková délka strany kanálu (vnitřní světlost kanálu + tloušťka obou stěn kanálu)

Poznámka 4.1: Výpočet celkové délky strany kanálu

Celková délka strany kanálu se vypočte jako součet dvojnásobku poloviční tloušťky kanálu (viz obr. 3.3 – veličina „c/2“) a délky strany průtočného průřezu kanálu.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala parametrickou studií zařízení pro zpětné získávání tepla, vlivem změny provozních a geometrických parametrů výměníku decentrální větrací jednotky s regenerací tepla na účinnost zpětného získávání tepla (ZZT).

Stanovení vlivu systému řízení (tzn. provozních parametrů) na účinnost ZZT bylo provedeno pomocí měření dat na reálném fyzickém modelu jednotky a zahrnovalo vliv následujících parametrů: teplota a vlhkost vzduchu uvnitř a vně místnosti a tři úrovně průtoku vzduchu jednotkou. Při narůstajícím rozdílu teplot mezi vnitřním a vnějším prostředím vzrůstala i účinnost ZZT. Při nárůstu objemového průtoku vzduchu přes jednotku účinnost klesala. Účinnost byla definována jako podíl tepla zachyceného výměníkem k teplotě, které by systémem prošlo, kdyby systém nedisponoval ZZT. Průtoky vzduchu, jako vstupní veličina do výpočtů účinnosti, byly zjištěny pomocí měření lokálních rychlostí proudění vzduchu v průřezu měřicího potrubí a následných výpočtů. Měřicí potrubí bylo instalováno dodatečně před měřenou jednotku.

Vliv modifikace geometrických parametrů na účinnost byl stanoven pomocí CFD simulace. CFD simulace byla zvolena z důvodu snazší proveditelnosti studie, kdy nebylo třeba vyrábět fyzický model výměníku pro zjištění dat potřebných pro studii. Nejprve byl vytvořen model s tvarem kanálů výměníku totožným s tvarem kanálů měřeného fyzického modelu výměníku. Pomocí dat z měření fyzického modelu výměníku byl CFD výpočtový model validován. Následně byly na validovaném modelu zkoumány vlivy změn tvaru geometrie výměníku. Tyto však nebyly vyhodnoceny, jelikož při modifikaci tvaru kanálů došlo i ke změně velikosti hmoty výměníku (vlivem umístění kanálů vedle sebe) a výsledná data byla kombinací vlivu dvou výše uvedených změn. Z důvodu dosažení alespoň částečného splnění dílčího cíle bylo přistoupeno k odhadu vlivu poměrů plochy průřezu materiálu výměníku k průtočné ploše vzduchu na účinnost ZZT, ověření tohoto vlivu je možno provést na validovaném modelu.

Diplomová práce přinesla přehled o dějích probíhajících v jednotce při jejím provozu. Poznatky lze využít při snaze o zvýšení účinnosti zpětného získávání tepla zkoumané jednotky. Zvyšování účinnosti ZZT jednotky vede ke zkrácení doby návratnosti investice do celého decentrálního systému. Systém je již v současnosti využíván k větrání novostaveb a zejména rekonstruovaných domů a některých veřejných budov (školy, obecní úřady atd.).

Na závěr je třeba si uvědomit, že prioritou při řešení mikroklimatu uvnitř budov by mělo být snížení koncentrace oxidu uhličitého, ovlivňující duševní pohodu a výkonnost obyvatelstva (např. ve školách). Zpětné získávání tepla z odpadního vzduchu je pouze malou částí celé problematiky větrání.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 0.1: Vývojový diagram postupu prací na DP	16
Obr. 0.2: Přehled dílčích kroků k dosažení cílů práce	17
Obr. 1.1: Pracovní cyklus jednotky [1]	18
Obr. 1.2: Princip provětrávání místnosti	18
Obr. 1.3: Keramický výměník	19
Obr. 2.1: Návrh provedení experimentu	20
Obr. 2.2: Schéma měřicí sestavy	22
Obr. 2.3: Detailní zapojení měřicích sond	23
Obr. 2.4: Propojení sond a měřicích přístrojů	23
Obr. 2.5: Metodika měření lokálních rychlostí u série měření č. 1	27
Obr. 2.6: Metodika měření lokálních rychlostí u série měření č. 2	28
Obr. 2.7: Kombinovaná sonda TESTO - rychlost, teplota	29
Obr. 2.8: Měřicí otvor pro sérii měření č. 1	29
Obr. 2.9: Měřicí otvory pro sérii měření č. 2	30
Obr. 2.10: Doba potřebná k ustálení proudění <i>se započtením</i> prvních 10 s měření	31
Obr. 2.11: Doba potřebná k ustálení proudění <i>bez započtení</i> prvních 10 s měření	32
Obr. 2.12: Rychlostní profil proudění při nasávání, série měření č. 1	33
Obr. 2.13: Rychlostní profil proudění při odsávání, série měření č. 1	33
Obr. 2.14: Rychlostní profil proudění při nasávání, směr X, série měření č. 2	34
Obr. 2.15: Rychlostní profil proudění při nasávání, směr Y, série měření č. 2	34
Obr. 2.16: Rychlostní profil proudění při odsávání, směr X, série měření č. 2	35
Obr. 2.17: Rychlostní profil proudění při odsávání, směr Y, série měření č. 2	35
Obr. 2.18: Schéma postupu při stanovení velikosti objemových průtoků vzduchu jednotkou	36
Obr. 2.19: Střední rychlost proudění vzduchu přes jednotku v závislosti na napětí, série měření č. 1	38
Obr. 2.20: Přepočet na průměrnou rychlost v dílčích průřezech	40
Obr. 2.21: Technické parametry kombinované měřicí sondy TESTO [4]	41
Obr. 2.22: Rychlostní profil proudění včetně nejistot měření, nasávání dovnitř, série měření č. 2	42
Obr. 2.23: Rychlostní profil proudění včetně nejistot měření, odsávání ven, série měření č. 2	43
Obr. 2.24: Střední rychlost proudění vzduchu přes jednotku v závislosti na napětí, série měření č. 2	44
Obr. 2.25: Princip přepočtu poměrných rychlostí	45
Obr. 2.26: Přepočítané střední rychlosti proudění, M2	46
Obr. 2.27: Přepočítaný objemový průtok vzduchu jednotkou, M2	48
Obr. 2.28: Měřené proměnné provozní podmínky jednotky	49
Obr. 2.29: Schéma měřených veličin	50
Obr. 2.30: Kabeláž k venkovním měřicím sondám	51
Obr. 2.31: Umístění sestavy v rámu okna v 2. NP	51
Obr. 2.32: Pohled na měřicí sestavu zevnitř	51
Obr. 2.33: Vnitřní strana výměníku osazená ventilátorem a teplotní sondou	51
Obr. 2.34: Detail umístění teplotní sondy na vnitřní straně výměníku	52
Obr. 2.35: Umístění vnitřní kombinované sondy	52

Obr. 2.36: Detail přechodu měřicí potrubí - ventilátor	52
Obr. 2.37: Umístění venkovní kombinované sondy	52
Obr. 2.38: Čelní pohled na výměník, umístění měřicích sond v kanálech výměníku	53
Obr. 2.39: Rozsah měřených délek půlperiod	54
Obr. 2.40: Schéma naměřených dat pro cyklické nabíjení a vybíjení	54
Obr. 2.41: Křivky cyklického nabíjení a vybíjení výměníku, M1, 12,0V, $\tau/2 = 70$ s	56
Obr. 2.42: Křivky cyklického nabíjení a vybíjení výměníku, M1, 10,5V, $\tau/2 = 70$ s	56
Obr. 2.43: Křivky cyklického nabíjení a vybíjení výměníku, M1, 7,2 V, $\tau/2 = 70$ s	56
Obr. 2.44: Křivky cyklického nabíjení a vybíjení výměníku, M2, 12,0 V, $\tau/2 = 70$ s	57
Obr. 2.45: Křivky cyklického nabíjení a vybíjení výměníku, M2, 12,0 V, $\tau/2 = 150$ s	57
Obr. 2.46: Schéma vyhodnocení dat při měření cyklických křivek nabíjení a vybíjení	58
Obr. 2.47: Metodika výpočtu účinnosti výměníku	59
Obr. 2.48: Ovlivnění měření přísáváním vyfukovaného vzduchu	64
Obr. 2.49: Teplo akumulované do hmoty výměníku při nabíjení	66
Obr. 2.50: Teplo uvolněné z hmoty výměníku při vybíjení	66
Obr. 2.51: Graf účinnosti v závislosti na rozdílu teplot mezi vnitřním a venkovním prostředím, hodnoty ze sérií měření č. 1 a č. 2	68
Obr. 2.52: Graf účinnosti v závislosti na délce půlperiody přepínání pro napětí 12,0 V, hodnoty ze série měření č. 2	69
Obr. 2.53: Graf účinnosti v závislosti na objemovém průtoku vzduchu jednotkou pro délku půlperiody 70 s, hodnoty ze série měření č. 1	71
Obr. 2.54: Zjednodušení při přechodném ději	72
Obr. 2.55: Přehled naměřených dat	74
Obr. 2.56: Křivky úplného nabíjení a úplného vybíjení – naměřená data, 12,0 V	75
Obr. 2.57: Křivky úpl. nab. a úpln. vyb. - detail	75
Obr. 2.58: Křivky úplného nabíjení a úplného vybíjení – naměřená data, 10,5 V	76
Obr. 2.59: Křivky úplného nabíjení a úplného vybíjení – naměřená data, 7,2 V	77
Obr. 2.60: Přehled naměřených dat a jejich vyhodnocení	78
Obr. 2.61: Výběr hodnot pro výpočty z jednotlivých cyklů	79
Obr. 2.62: Validační křivka pro režim vybíjení výměníku, teplota před výměníkem t, V, out ; $U = 12,0$ V	83
Obr. 2.63: Validační křivka pro režim vybíjení výměníku, teplota za výměníkem t, V, in ; $U = 12,0$ V	83
Obr. 2.64: Validační křivka pro režim vybíjení výměníku, teplota před výměníkem t, V, out ; $U = 10,5$ V	84
Obr. 2.65: Validační křivka pro režim vybíjení výměníku, teplota za výměníkem t, V, in ; $U = 10,5$ V	84
Obr. 2.66: Validační křivka pro režim vybíjení výměníku, teplota před výměníkem t, V, out ; $U = 7,2$ V	85
Obr. 2.67: Validační křivka pro režim vybíjení výměníku, teplota za výměníkem t, V, in ;	85

U = 7,2 V	85
Obr. 2.68 Přepočítaný objemový průtok vzduchu jednotkou, M2	86
Obr. 2.69: Graf účinnosti v závislosti na rozdílu teplot mezi vnitřním a venkovním prostředím, hodnoty ze sérií měření č. 1 a č. 2	87
Obr. 2.70: Validační křivka pro režim vybíjení výměníku, teplota před výměníkem t,V,out;	88
U = 12,0 V	88
Obr. 2.71: Validační křivka pro režim vybíjení výměníku, teplota za výměníkem t,V,in; U = 12,0 V	88
Obr. 3.1: Schéma postupu při validaci CFD modelu	90
Obr. 3.2: Tvorba 3D CAD modelu systému	91
Obr. 3.3: Zjednodušení modelu výměníku	92
Obr. 3.4: Zjednodušený model výměníku	93
Obr. 3.5: Převod 3D CAD modelu na CFD model	93
Obr. 3.6: Rozdělení těles na jednotlivé plochy pro přiřazení OP	94
Obr. 3.7: Schéma ploch, na kterých bylo prováděno vyhodnocení veličin	95
Obr. 3.8: Výpočtová síť, podélný řez (1)	96
Obr. 3.10: Výpočtová síť, podélný řez (1), detail vstupu do výměníku	96
Obr. 3.9: Výpočtová síť, podélný řez (1), detail	96
Obr. 3.11: Výpočtová síť, příčný řez uprostřed (2)	96
Obr. 3.12: Typický průběh reziduí během simulací	96
Obr. 3.14: Vizualizace rozložení teplot po délce modelu, řez č. 1, čas simulace t = 66 s	97
Obr. 3.15: Vizualizace rozložení teplot po průřezu systému, řez č. 2, čas simulace t = 66 s	97
Obr. 3.13: Graf průměrné teploty vystupující z výměníku, hodnoty z měřicí plochy č. 4	97
Obr. 3.16: Šířka ventilátoru	99
Obr. 3.17: Průběh validace CFD modelu systému	100
Obr. 3.18: Křivka průběhu teploty za výměníkem (tzn. na vnitřní straně výměníku) získaného z validovaného CFD modelu	101
Obr. 4.1: Původní a modifikované tvary kanálů	103
Obr. 4.2: Schéma postupu při parametrické studii	104
Obr. 4.3: Křivka průběhu teploty za výměníkem (tzn. na vnitřní straně výměníku) pro modifikované tvary kanálů výměníku, získané z validovaného CFD modelu	105
Obr. 4.4: Kvantitativní způsob vyhodnocení uvolněného tepla z výměníku	106
Obr. 4.5: Odhad vlivu poměru plochy materiálu výměníku a plochy kanálů výměníku v příčném průřezu přes výměník na účinnost	107

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1: Časové období jednotlivých měření	26
Tab. 2.2: Dílčí poloměry měření, série č. 1, vzdálenost bodů od osy, viz obr. 2.7	26
Tab. 2.3: Dílčí poloměry měření, série č. 1, vzdálenost bodů od stěny, korekce na obrázek 2.5	27
Tab. 2.4: Dílčí poloměry měření, série č. 2, vzdálenost bodů od osy	28
Tab. 2.5: Dílčí poloměry měření, série č. 2, vzdálenost bodů od stěny, korekce na obrázek 2.8	28
Tab. 2.6: Číselné hodnoty rychlostí proudění vzduchu, série měření č. 1	38
Tab. 2.7: Koeficienty rozšíření standardní nejistoty typu A [3]	39
Tab. 2.8: Číselné hodnoty rychlostí proudění vzduchu, série měření č. 2	43
Tab. 2.9: Poměrné velikosti středních rychlostí proudu, série měření č. 1	45
Tab. 2.10: Přepočtené velikosti středních rychlostí proudu, série měření č. 2	45
Tab. 2.11: Výpočet rychlostí proudění a objemového průtoku vzduchu jednotkou	47
Tab. 2.12: Celková účinnost jednotky v závislosti na rozdílu teplot mezi vnitřním a venkovním prostředím	68
Tab. 2.13: Hodnoty vnitřních a venkovních teplot pro jednotlivé teplotní spády	69
Tab. 2.14: Podmínky měření při měření křivek úplného nabíjení a úplného vybíjení výměníku, 12.0 V	75
Tab. 2.15: Podmínky měření při měření křivek úplného nabíjení a úplného vybíjení výměníku, 12.0 V	76
Tab. 2.16: Podmínky měření při měření křivek úplného nabíjení a úplného vybíjení výměníku, 12.0 V	77
Tab. 3.1: Přiřazení OP okrajovým plochám tělesa	94
Tab. 3.2: Přehled změny parametrů při ladění CFD modelu	98
Tab. 3.3: Parametry validovaného CFD modelu	101
Tab. 4.1: Parametry ovlivňující účinnost ZZT	102
Tab. 4.2: Parametry jednotlivých modifikací tvaru kanálů	103
Tab. 4.3: Parametry validovaného CFD modelu	105

SEZNAM POZNÁMEK

Poznámka 2.1: Stanovení délky měřicího potrubí	21
Poznámka 2.2: Identifikace směru otáčení ventilátorů	24
Poznámka 2.3: Vyřešení problému nespolehlivé funkce výkonového budiče	24
Poznámka 2.4: Zapínání teploměru TESTO 735	25
Poznámka 2.5: Zjednodušení metodiky měření v sérii č. 1	27
Poznámka 2.6: Závislost střední rychlosti proudění vzduchu přes jednotku na napětí na ventilátorech	38
Poznámka 2.7: Označení kombinované nejistoty měření v dalším textu	41
Poznámka 2.8: Rozdílné hodnoty rychlostí pro nasávání a odsávání vzduchu	44
Poznámka 2.9: Vysvětlivky k tabulce č. 2.11	48
Poznámka 2.10: Zhotovení otvoru do výměníku	50
Poznámka 2.11: Zdůvodnění instalace potrubí pro měření rychlosti při měření křivek cyklického nabíjení a vybíjení výměníku	52
Poznámka 2.12: Umístění sond v kanálech výměníku	53
Poznámka 2.13: Měření barometrického tlaku	53
Poznámka 2.14: Terminologie – perioda a půlperioda	55
Poznámka 2.15: Metodika počtů s entalpiemi a jejich symbolické označování	60
Poznámka 2.16: Důvod použití entalpie $\text{MIN}\{i_{V,\text{out}}\}$ ve výpočtech namísto užití entalpie i_{out}	64
Poznámka 2.17: Rozdílné velikosti tepla naakumulovaného do výměníku a tepla uvolněného z výměníku za dobu jedné periody	66
Poznámka 2.18: Korekce hodnot účinnosti v tabulce č. 2.12	69
Poznámka 2.19: Vysvětlení k označení směru proudění v tabulce č. 2. 12	70
Poznámka 2.20: Přejížděné jevy při nabíjení a vybíjení výměníku – zjednodušení terminologie	72
Poznámka 2.21: Určení počtu cyklů, ze kterých byly vytvářeny průměrné hodnoty křivek úplného nabíjení a úplného vybíjení výměníku	78
Poznámka 2.22: Popis detailů grafů validačních křivek	82
Poznámka 3.1: Chybné vyhodnocení průměrné teploty vzduchu vystupujícího z výměníku, vyhodnocované z plochy č. 3	97
Poznámka 3.2: Oprava chyby ve výpočtu rychlosti proudění v kanálu	99
Poznámka 3.3: Závislost rychlosti proudění vzduchu v kanálu výměníku na poloze kanálu v celkovém příčném průřezu výměníku	99
Poznámka 4.1: Výpočet celkové délky strany kanálu	107

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$3D$	- trojrozměrný prostor
$\pm N. M.$	- nejistota měření
Δp	- tlaková ztráta výměníku
ΔT	- rozdíl teplot mezi vnitřním a venkovním prostředím
φ_{in}	- relativní vlhkost vzduchu v místnosti
φ_{out}	- relativní vlhkost vzduchu ve venkovním prostředí
$\varphi_{V,out,nab''}$	- relativní vlhkost vzduchu nasyceného vlhkostí
$\varphi_{V,out,vyb}$	- relativní vlhkost vzduchu na venkovní straně výměníku při režimu vybíjení výměníku
$\phi H 2M$	- průměrná hodnota ze dvou měření křivek vybíjení (tzn. ze dvou vybíjecích cyklů)
$\phi H 3M$	- průměrná hodnota ze tří měření křivek vybíjení (tzn. ze tří vybíjecích cyklů)
η	- účinnost ZZT regeneračního výměníku
η_{NAB}	- účinnost ZZT při nabíjení výměníku (odsávání vzduchu z místnosti)
η_{VYB}	- účinnost ZZT při vybíjení výměníku (nasávání vzduchu do místnosti)
$\rho_{vým}$	- hustota výměníku
τ	- perioda přepnutí chodu ventilátorů (reverzace směru toku vzduchu jednotkou)
$\tau/2$	- půlperioda přepnutí chodu ventilátorů
a_{kan}	- délka strany kanálu výměníku
$a_{kan,celk}$	- celková délka strany kanálu (vnitřní světlost kanálu + tloušťka obou stěn kanálu)
a_{vst}	- délka strany vstupního úseku
B	- šířka ventilátoru
c_E	- měrná tepelná kapacita ledu
c_w	- měrná tepelná kapacita vody
CAD	- Computer aided design, počítačem podporované navrhování
CFD	- (Computational Fluid Dynamics), český ekvivalent přibližně: „počítačová dynamika tekutin“
D	- vnitřní průměr měřicího potrubí
e	- počet ekvidistantních poloměrů, na které je ploměr potrubí rozdělen
h	- nadmořská výška v místě měření
i	- i-tý poloměr mezikruží
i_{in}	- entalpie vzduchu uvnitř místnosti
$i_{V,in}$	- entalpie vzduchu na vnitřní straně výměníku
j	- index charakterizující uvažovanou teplotu, $j = (t_{V,in}; t_{V,middle}; t_{V,out})$
k	- počet kanálů výměníku
KR	- koeficient rozšíření výběrové směrodatné odchylky (část rovnice 6.54, která leží pod odmocninou včetně odmocniny)
$KU-CFD$	- křivka průběhu teploty vzduchu za výměníkem pro upravenou geometrii

l_E	- měrné skupenské teplo tání ledu
l_{VST}	- délka vstupního úseku oblasti se vzduchem
l_{VYM}	- délka výměníku
l_{VYS}	- délka výstupního úseku oblasti se vzduchem
l_{VZD}	- délka části se vzduchem
m	- hmotnost výměníku
m_{nab}	- hmotnostní tok vlhkého vzduchu pro případ nabíjení výměníku
m_{vyb}	- hmotnostní tok vlhkého vzduchu pro případ vybíjení výměníku
$i_{V,out,nab}$	- entalpie vzduchu na vnější straně výměníku při nabíjení výměníku
$m_{V,nab}$	- hmotnostní tok suchého vzduchu jednotkou při nabíjení výměníku
$m_{V,vyb}$	- hmotnostní tok suchého vzduchu jednotkou při vybíjení výměníku
$m_{W,vyb,i}$	- hmotnostní tok vypařované vlhkosti při vybíjení výměníku
M	- symbol pro označení teploty získané měřením na fyzickém modelu výměníku
$M+N$	- symbol pro naměřenou teplotu s přičtenou nejistotou měření
$M-N$	- symbol pro naměřenou teplotu s odečtenou nejistotou měření
$M1$	- symbol pro sérii měření č. 1
$M2$	- symbol pro sérii měření č. 2
MEP	- metoda ekvidistantních poloměrů
$MIN\{i_{v,out,nab}\}$	- minimální hodnota entalpie vzduchu na vnější straně při nabíjení výměníku
$MIN\{i_{v,out,vyb}\}$	- minimální hodnota entalpie vzduchu na vnější straně při vybíjení výměníku naměřená po dobu jedné periody (τ)
MKP	- metoda konstantních poloměrů
n	- počet měření
OP	- okrajové podmínky
p	- barometrický tlak vzduchu v nadmořské výšce místa měření
$p_{měř}$	- naměřený barometrický tlak přepočtený na hladinu moře
$p_{p,in}$	- parciální tlak sytých vodních par
$p_{p,out}$	- parciální tlak sytých vodních par ve vzduchu ve venkovním prostředí
$p_{p,V,out}$	- parciální tlak sytých vodních par ve vzduchu na venkovní straně výměníku
P	- interval spolehlivosti, viz tab. 2.7
PC	- osobní počítač (personal computer)
PF	- faktor profilu
PP	- počáteční podmínky
PPP	- paralelní port počítače
$Q_{AKUM,NAB}$	- teplo pohlcené výměníkem při režimu nabíjení
$Q_{AKUM,VYB}$	- teplo uvolněné z výměníku při režimu vybíjení
$Q_{NAB,BEZ}$	- teplo, které by proniklo z místnosti do venkovního prostředí za dobu jedné půlperiody otvorem bez výměníku (volný otvor)
$Q_{NAB,BEZ,i}$	- teplo, které by proniklo z místnosti do venkovního prostředí za dobu 1 s otvorem bez výměníku (volný otvor)
$Q_{NAB,S}$	- teplo, které pronikne z místnosti do venkovního prostředí za dobu jedné půlperiody, jestliže je v otvoru výměník
$Q_{NAB,S,i}$	- teplo, které pronikne z místnosti do venkovního prostředí za dobu 1 s, jestliže je v otvoru výměník
Q_V	- objemový průtok vzduchu jednotkou

$Q_{VYB,BEZ}$	- teplo, které by proniklo z venkovního prostředí do místnosti za <i>dobu jedné půlperrody</i> otvorem bez výměníku (volný otvor)
$Q_{VYB,BEZ,i}$	- teplo, které by proniklo z venkovního prostředí do místnosti za <i>dobu 1 s</i> otvorem bez výměníku (volný otvor)
$Q_{VYB,S}$	- teplo, které pronikne z venkovního prostředí do místnosti za <i>dobu jedné půlperrody</i> , jestliže je v otvoru výměník
$Q_{VYB,S,i}$	- teplo, které pronikne z venkovního prostředí do místnosti za <i>dobu 1 s</i> , jestliže je v otvoru výměník
$Q_{W,VYB,i}$	- teplo uvolněné z výměníku, které je navázané do vlhkosti odpařené z povrchu výměníku
r_i	- i-tá velikost poloměru mezikruží
r_V	- měrná plynová konstanta suchého vzduchu
R	- vnitřní poloměr měřicího potrubí
s	- kombinovaná nejistota typu C
S	- průřez měřicího potrubí
$S_{vst,celk}$	- celková průtočná plocha kanálů výměníku
$S_{i,12,0 V}$	- průřez i-tého měřicího průřezu potrubí
$S_{průt,1k}$	- průtočný průřez jednoho kanálu výměníku
$S_{vst,1k}$	- průtočný průřez vstupního úseku vztažený na jeden kanál
$S_{vst,celk}$	- celková průtočná plocha vstupního úseku
SW	- symbol pro software
t	- čas měření
t_{in}	- teplota vzduchu v interiéru budovy
t_{out}	- teplota vzduchu v exteriéru budovy
$t_{V,in}$	- teplota vzduchu na vnitřní straně výměníku
$t_{V,j}$	- průměrná teplota vzduchu z vybraného počtu cyklů měření (aritmetický průměr)
$t_{V,j,i}$	- i-tá teplota vzduchu z vybraného počtu cyklů
$t_{V,middle}$	- teplota vzduchu uprostřed výměníku
$t_{V,out}$	- teplota vzduchu na venkovní straně výměníku
v_{air}	- rychlost proudění vzduchu
U	- napětí na svorkách ventilátorů
$U_{A,i}$	- rozšířená nejistota typu A i-tého dílčího průřezu
$U_{A,j}$	- rozšířená nejistota typu A pro jednotlivé teploty
U_B	- nejistota typu B
$U_{B,i}$	- nejistota typu B i-tého dílčího průřezu
$U_{C,i}$	- kombinovaná nejistota i-tého dílčího průřezu
$U_{C,j}$	- kombinovaná nejistota pro aritmetické průměry měřených teplot
$v_{1k, 12,0V}$	- rychlost proudění vzduchu v kanálu
$v_{vst,12,0V}$	- střední rychlost proudění vzduchu ve vstupním úseku systému, vstupní úsek systému viz obr. 3.4 a 3.5
$v_{vst,12,0V,vyb}$	- střední rychlost proudění vzduchu ve vstupním úseku systému, režim vybíjení výměníku
v_{vym}	- střední rychlost proudění v kanálcích výměníku
V	- objemový průtok vzduchu jednotkou
$V_{12,0V}$	- objemový průtok potrubím při napětí 12,0 V
$V_{i,12,0 V}$	- objemový průtok i-tým průřezem potrubí při napětí 12,0 V
V_{nab}	- objemový průtok vlhkého vzduchu jednotkou při nabíjení

V_{vyb}	- objemový průtok vlhkého vzduchu jednotkou při vybíjení
V_{vym}	- objem materiálu výměníku
VB	- výkonový budič
VK	- zkratka znamenající „validační křivka“
$VK-CFD$	- validační křivka získaná CFD výpočtem
\bar{w}	- aritmetický průměr rychlosti proudění
w_i	- i-tá naměřená lokální hodnota rychlosti proudění
$w_{i, 12,0V}$	- střední rychlost proudění i-tým průřezem potrubí při napětí 12,0 V
$w_{i,směr1}$	- je lokální hodnota rychlosti naměřená v i-tém bodě průřezu ve směru 1 (viz obrázek 2.6)
$w_{i,směr2}$	- lokální hodnota rychlosti naměřená v i-tém bodě průřezu ve směru 2 (viz obrázek 2.6)
$w_{osa, 7,2 V}$	- lokální hodnota rychlosti v ose potrubí při $U = 7,2 V$
$w_{osa, 10,5 V}$	- lokální hodnota rychlosti v ose potrubí při $U = 10,5 V$
$w_{osa, 12,0V}$	- lokální hodnota rychlosti v ose potrubí při $U = 12,0 V$
$w_{stř, 12,0V}$	- je střední rychlost proudění potrubím při napětí 12,0 V
x	- vzdálenost měřicí sondy od vnitř. okraje potrubí ve směru X
x_{in}	- měrná vlhkost vzduchu v místnosti
$x_{V,out,nab,i}$	- měrná vlhkost nasyceného vzduchu na vnější straně výměníku
$x_{V,out,vyb}$	- měrná vlhkost vzduchu na venkovní straně výměníku při režimu vybíjení výměníku (nasávání venkovního vzduchu dovnitř)
y	- vzdálenost měřicí sondy od vnitř. okraje potrubí ve směru Y
ZZT	- zařízení pro zpětné získávání tepla

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Decentrální systém větrání s rekuperací až 91% - Popis funkce. InVENTer [online]. [cit. 2012-02-21]. Dostupné z: <http://www.inventer.cz/popis-funkce.php>
- [2] PAVELEK, Milan; ŠTETINA, Josef. Experimentální metody v technice prostředí. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. 215 s. ISBN 978-80-214-3426-4
- [3] *Studentovo t-rozdělení a jeho aplikace* [online]. Olomouc, 2008 [cit. 2012-05-13]. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci. Vedoucí práce RNDr. Karel Hron, Ph.D. Str. 39. Dostupné z: <http://mant.upol.cz/soubory/OdevzdanePrace/B09/b09-13-aw.pdf>
- [4] *Testo 435*. Dostupné z: http://www.testo.cz/online/embedded/Sites/CZE/SharedDocuments/ProductBrochures/0560_4351_cz.pdf
- [5] Český hydrometeorologický ústav: Meteorologická stanice Holešov. [online]. [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://old.chmi.cz/meteo/opss/stanice.php?ukazatel=holesov>
- [6] PAVELEK, Milan a kol. Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. 215 s. ISBN 80-214-2409-5
- [7] Termomechanika: Vlhký vzduch [online]. 26.3.2012 [cit. 2012-05-19]. str. 5. Dostupné z: <http://studyenergyweb.fme.vutbr.cz/sew/wp-content/uploads/2012/03/TT-JS2011-12L-19.pdf>
- [8] JÍCHA, Miroslav. Přenos tepla a látky. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 160 s. ISBN 80-214-2029-4.
- [9] STAR-CCM+ 4.04.011 User's Guide. 2009 [cit. 2012-05-19].

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Software pro ovládání chodu ventilátorů – zdrojový kód	120
Příloha č. 2: Celkový pohled na měřicí sestavu	122
Příloha č. 3: Grafy účinností systému - doplnění	123
Příloha č. 4: Grafy validačních křivek pro CFD simulaci, teplota $t_{V,middle}$	132

PŘÍLOHY

Příloha č. 1: Software pro ovládání chodu ventilátorů – zdrojový kód

Zdrojový kód byl napsán v programovacím jazyce Turbo Pascal, kompletní kód je uveden v textu níže:

```
Program Blikac;
uses CRT,dos;
const BA = $3F8;
var  A: Integer;
     B: Integer;
     Klavesa: Char;
     s, v, m, h: word;
     sekundy: Integer;
     celkcas: Integer;
     celkcasA: Integer;
     pocetmereni: Integer;
     pocetmereni2: Integer;

     i: Integer; {pocet period}
     j: Integer;

const Max = 50;
var  P : array [1..Max] of Integer;

begin
  write('Zadej pocet pulperiod (maximalne 50) : ');
  readln(i);
  if (i > Max) then
    begin
      writeln('Zadan vetsi pocet pulperiod, program bude ukoncen ');
      exit;
    end;
  j := 1;
  While (i > 0) do
    begin
      write ('Zadej delku ',j,'. pulperiody (v sekundach) : ');
      readln(A);
      if (A < 1) then
        begin
          writeln('Zadana spatne pulperioda, program bude ukoncen ');
          exit;
        end;
      P[j] := A;
      j := j + 1;
      i := i - 1;
    end;
  i := j;

  { write ('zadej delku pulperiody (v sekundach) ');
  readln (A);}
  writeln ('-----');
  write ('Zadej pocet mereni kazde pulperiody : ');
  readln (pocetmereni);
```



```
pocetmereni2 := pocetmereni;

gettime(h,m,v,s);
{ writeln('Je prave: ',h,':',m,':',v,':',s,' hodin ');}
sekundy := Integer(v);

celkcas := Integer(h)*3600 + Integer(m)*60 + Integer(v);
{ writeln('Je prave celkcas : ',celkcas);}
writeln('-----');

A := P[1];
celkcasA := celkcas + A;

j := 1;
writeln('Prave merim ',j, '/', pocetmereni2, ' s pulperiodou: ',A);
  repeat
    repeat
      Port [BA+4] := 1;
      gettime(h,m,v,s);
      celkcas := Integer(h)*3600 + Integer(m)*60 + Integer(v);

      until (celkcas > celkcasA );

      celkcasA := celkcas + A - 1;
      repeat
        Port [BA+4] := 2;
        gettime(h,m,v,s);
        celkcas := Integer(h)*3600 + Integer(m)*60 + Integer(v);

        until (celkcas > celkcasA );

      pocetmereni := pocetmereni - 1;
      if ( pocetmereni = 0) then
        begin
          j := j + 1;
          if ( j >= i ) then
            begin
              writeln('Koncim mereni - PROBEHLO CELE');
              exit;
            end;

          pocetmereni := pocetmereni2;
          A := P[j];
          writeln('Prave merim ',j, '/', pocetmereni2, ' s pulperiodou: ',A);
          { writeln('Prave merim s pulperiodou: ',A);}
        end;

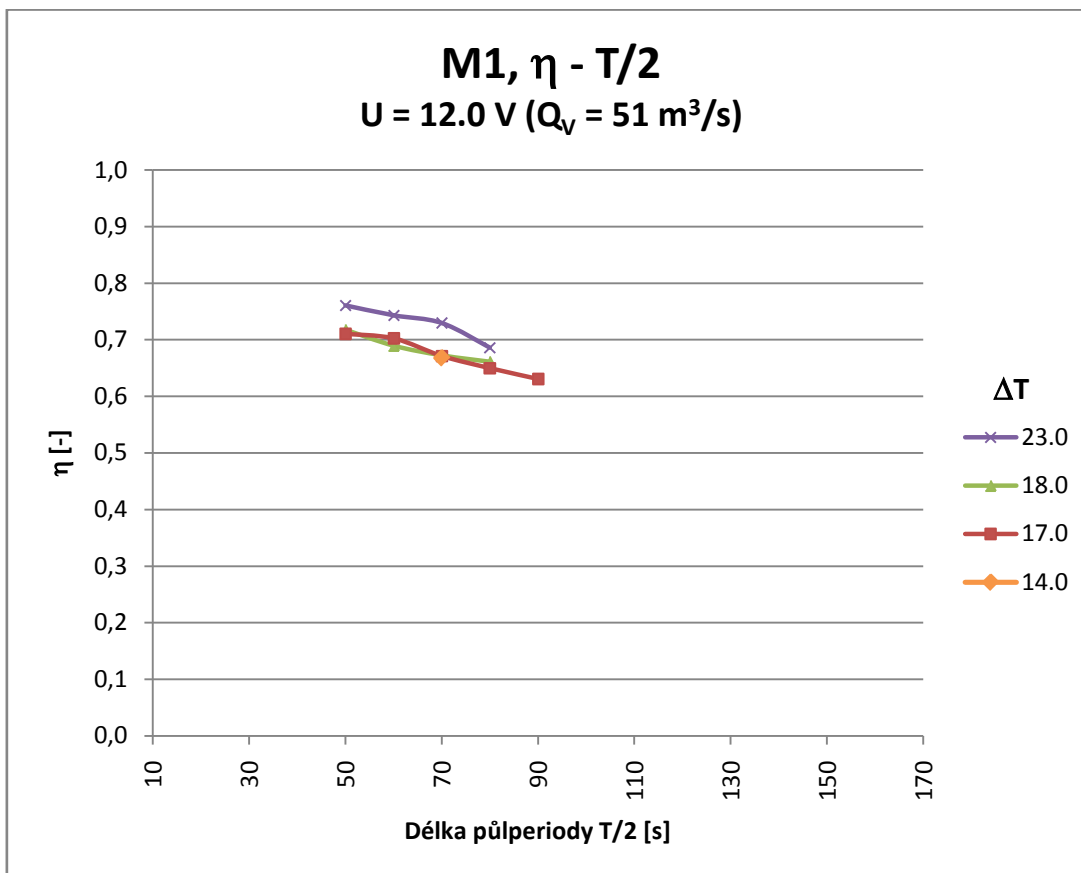
      celkcasA := celkcas + A - 1;

      until KeyPressed;
      klavesa := ReadKey;
      until klavesa = chr(27);
      writeln('Koncim mereni - NEPROBEHLO CELE - ukonceno uzivatelem')
end.
```

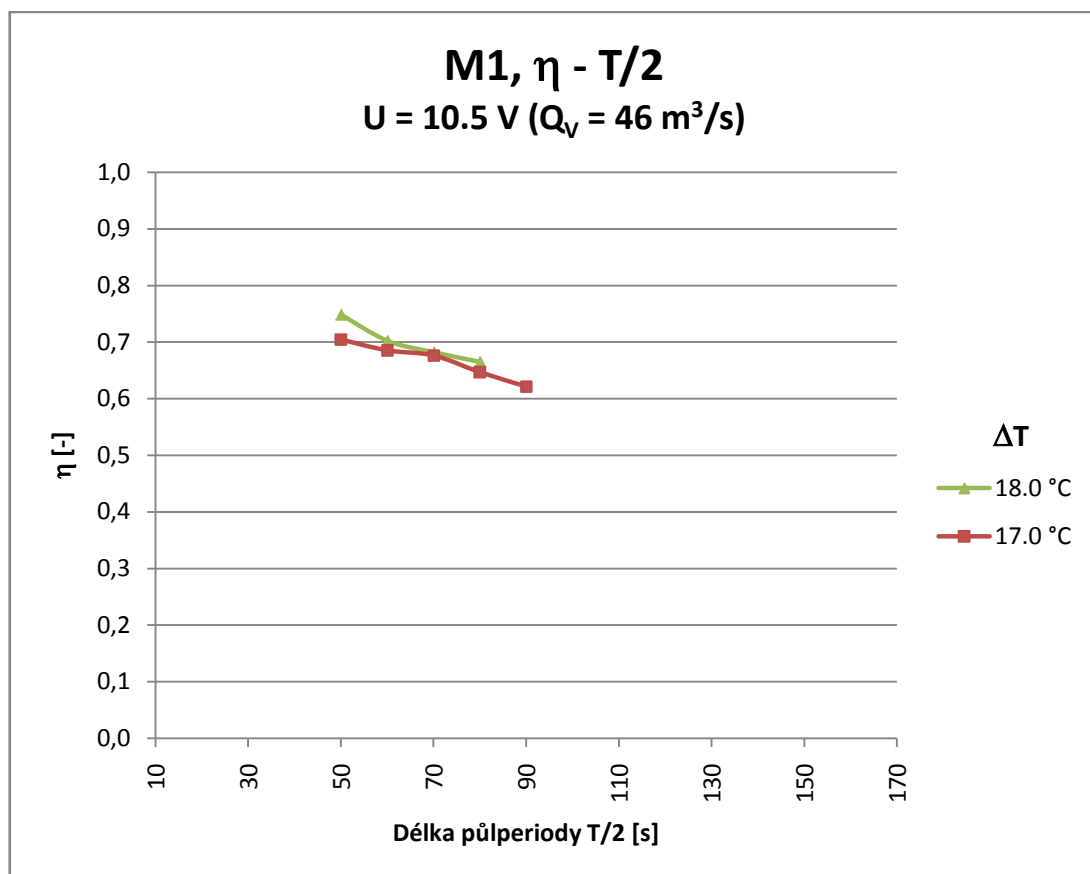
Příloha č. 2: Celkový pohled na měřicí sestavu



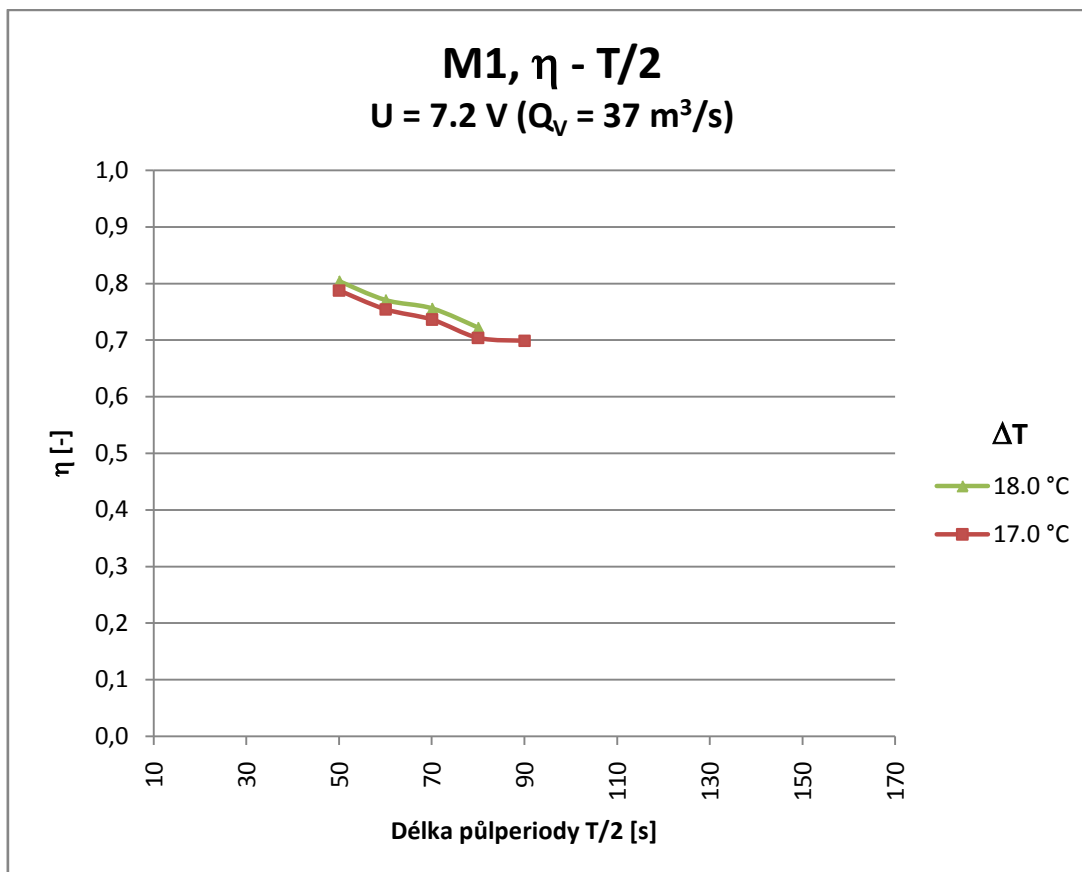
Příloha č. 3: Grafy účinností systému - doplnění



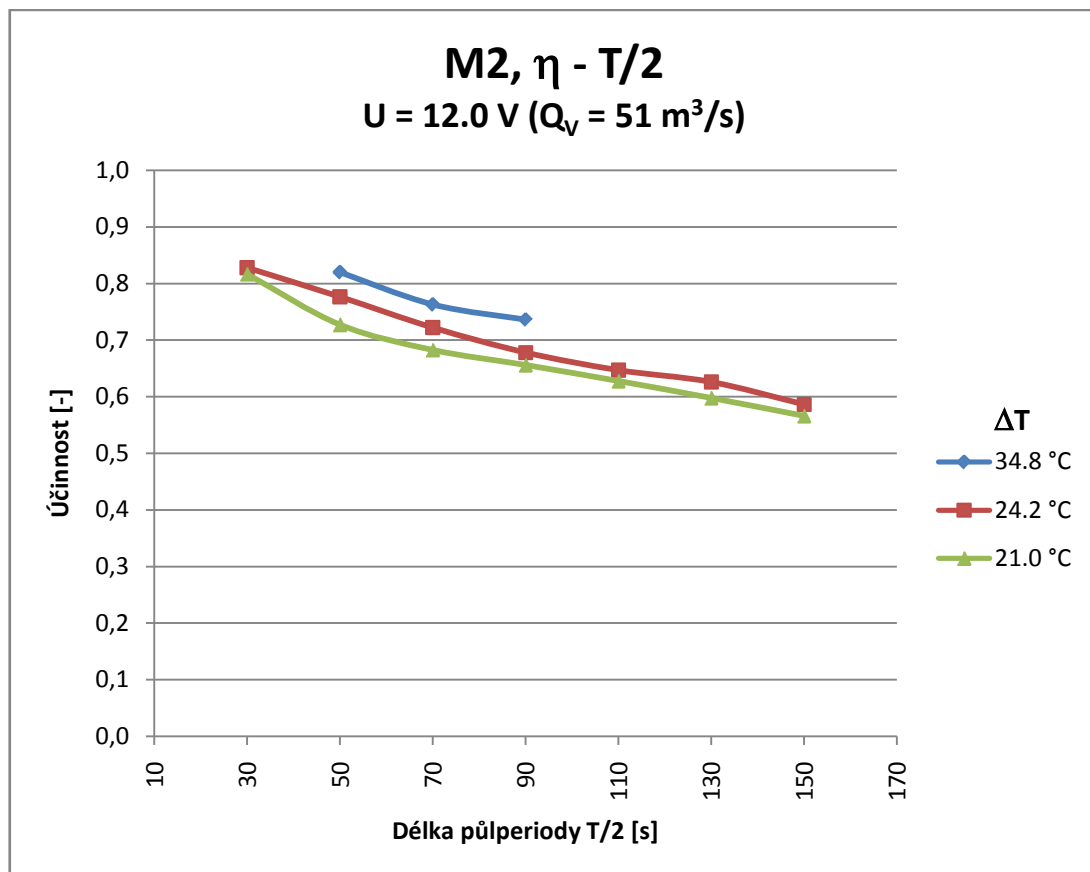
M1 CELKOVÁ účinnost výměníku η [%]				
napětí	U [V]	12.0		
délka půlperiody	rozdíl teplot (vnitřní - venkovní)			
T/2	delta T			
s	°C			
	14.0	17.0	18.0	23.0
150				
130				
110				
90		0.63		
80		0.65	0.66	0.69
70	0.67	0.67	0.67	0.73
60		0.70	0.69	0.74
50		0.71	0.72	0.76
30				



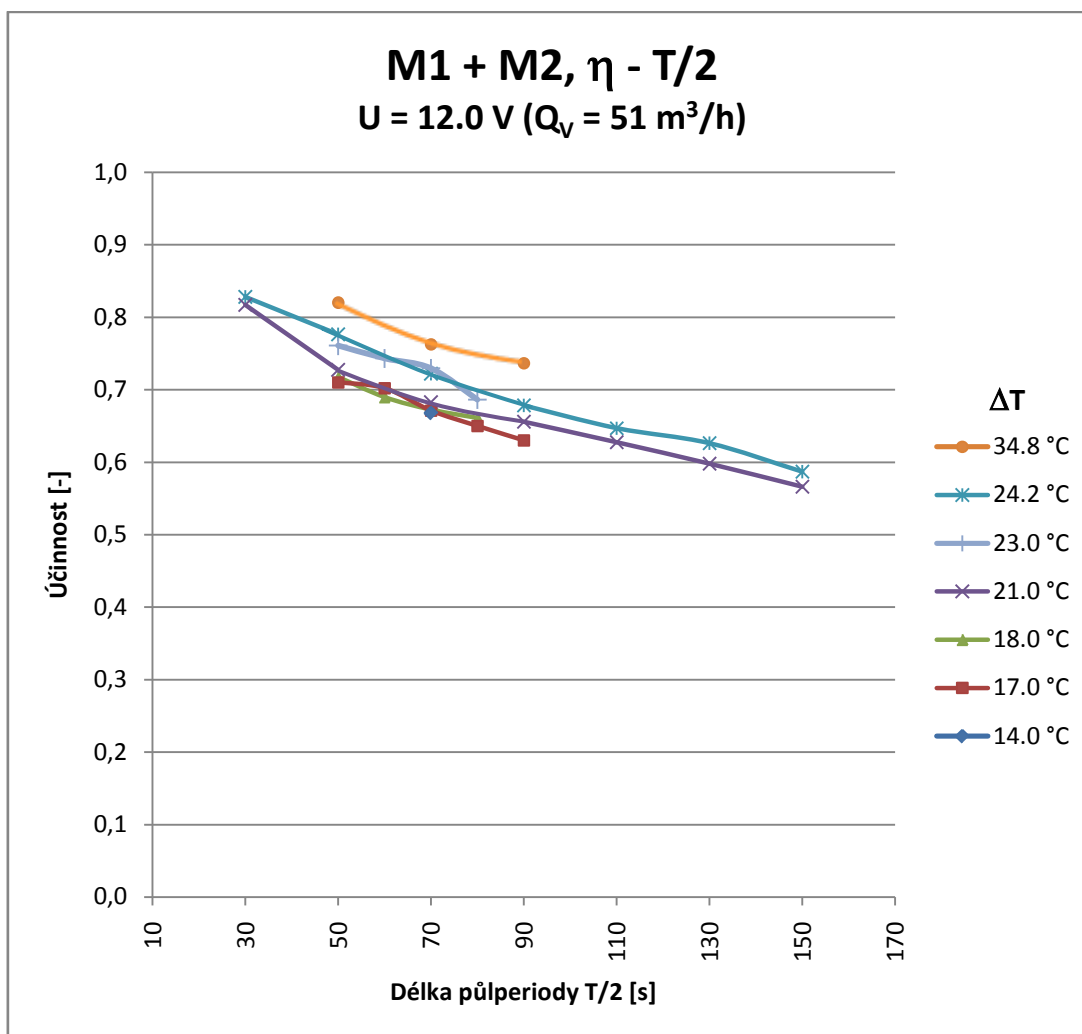
M1 CELKOVÁ účinnost výměníku η [%]				
napětí	U [V]	10.5		
Délka půlperiody	rozdíl teplot (vnitřní - venkovní)			
T/2	delta T			
s	°C			
	14.0	17.0	18.0	23.0
150				
130				
110				
90		0.62		
80		0.65	0.67	
70		0.68	0.68	
60		0.69	0.70	
50		0.70	0.75	
30				



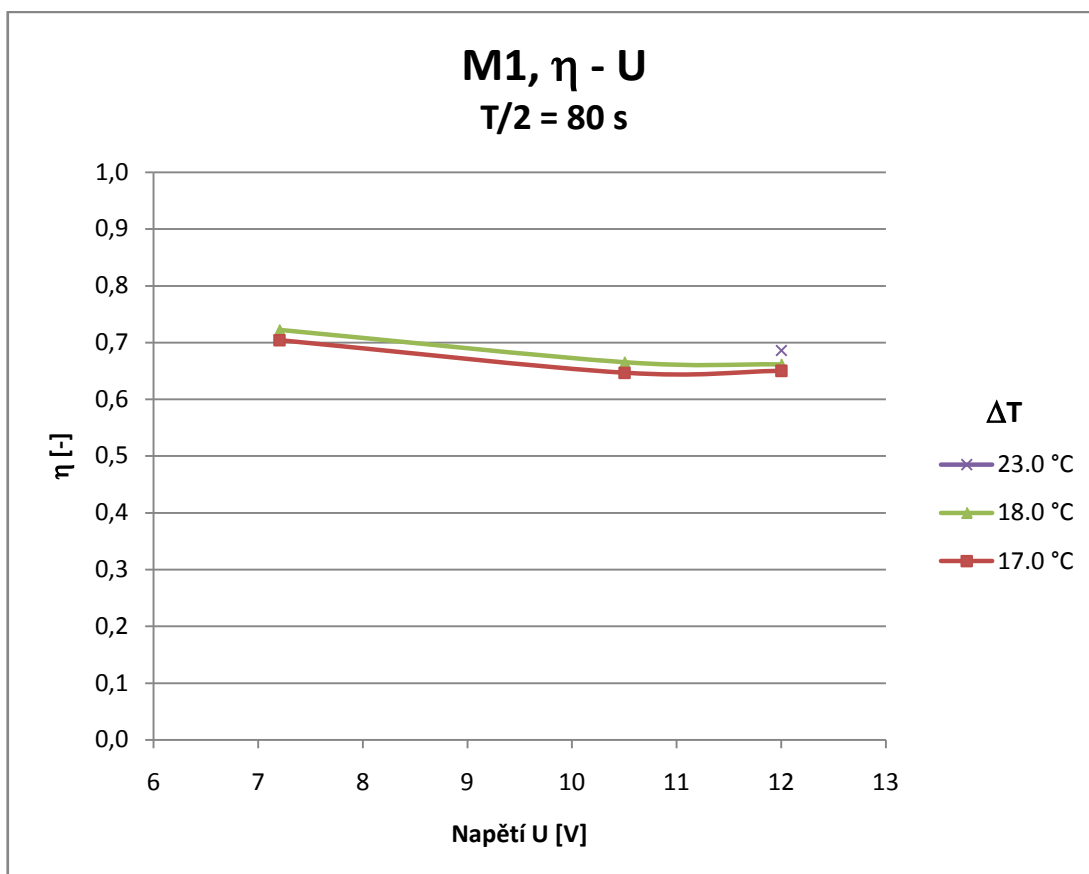
M1 CELKOVÁ účinnost výměníku η [%]				
napětí	U [V]	7.2		
délka půlperiody	rozdíl teplot (vnitřní - venkovní)			
T/2	delta T			
s	°C			
	14.0	17.0	18.0	23.0
150				
130				
110				
90		0.70		
80		0.70	0.72	
70		0.74	0.76	
60		0.75	0.77	
50		0.79	0.80	
30				



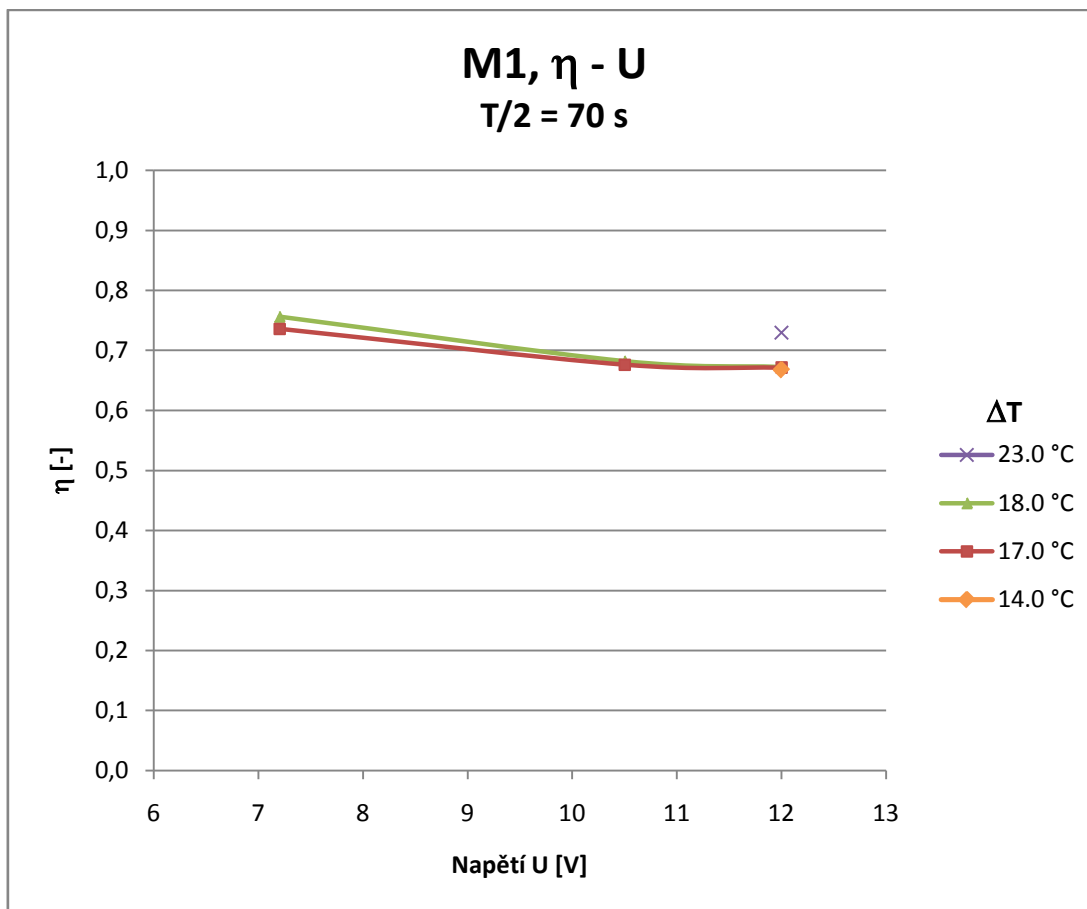
M2 CELKOVÁ účinnost výměníku η [%]			
napětí	U [V]	12.0	
délka půlperiody	rozdíl teplot (vnitřní - venkovní)		
T/2	delta T		
s	°C		
	21.0	24.2	34.8
150	0.57	0.59	
130	0.60	0.63	
110	0.63	0.65	
90	0.66	0.68	0.74
70	0.68	0.72	0.76
50	0.73	0.78	0.82
30	0.82	0.83	



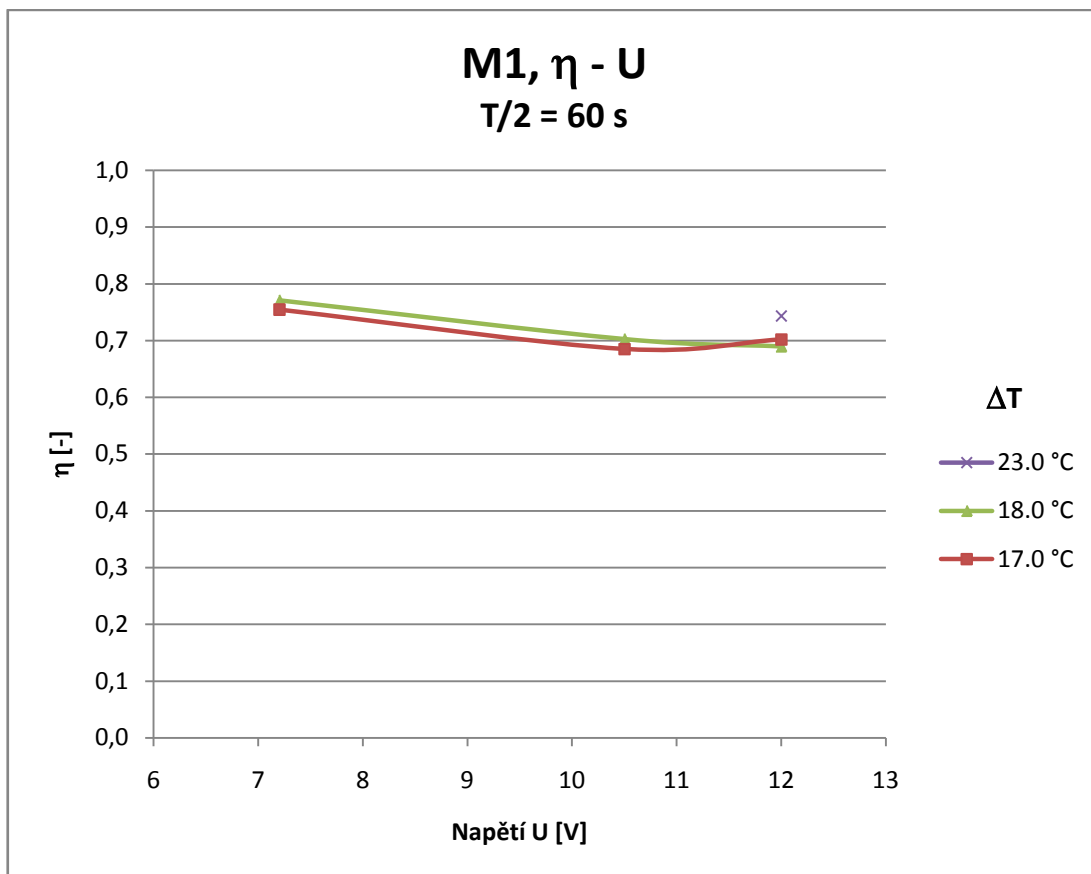
M1+M2 CELKOVÁ účinnost výměníku η [%]							
napětí	U [V]	12.0					
Délka půlperiody	rozdíl teplot (vnitřní - venkovní)						
T/2	delta T						
s	°C						
	14.0	17.0	18.0	21.0	23.0	24.2	34.8
150				0.57		0.59	
130				0.60		0.63	
110				0.63		0.65	
90		0.63		0.66		0.68	0.74
80		0.65	0.66		0.69		
70	0.67	0.67	0.67	0.68	0.73	0.72	0.76
60		0.70	0.69		0.74		
50		0.71	0.72	0.73	0.76	0.78	0.82
30				0.82		0.83	



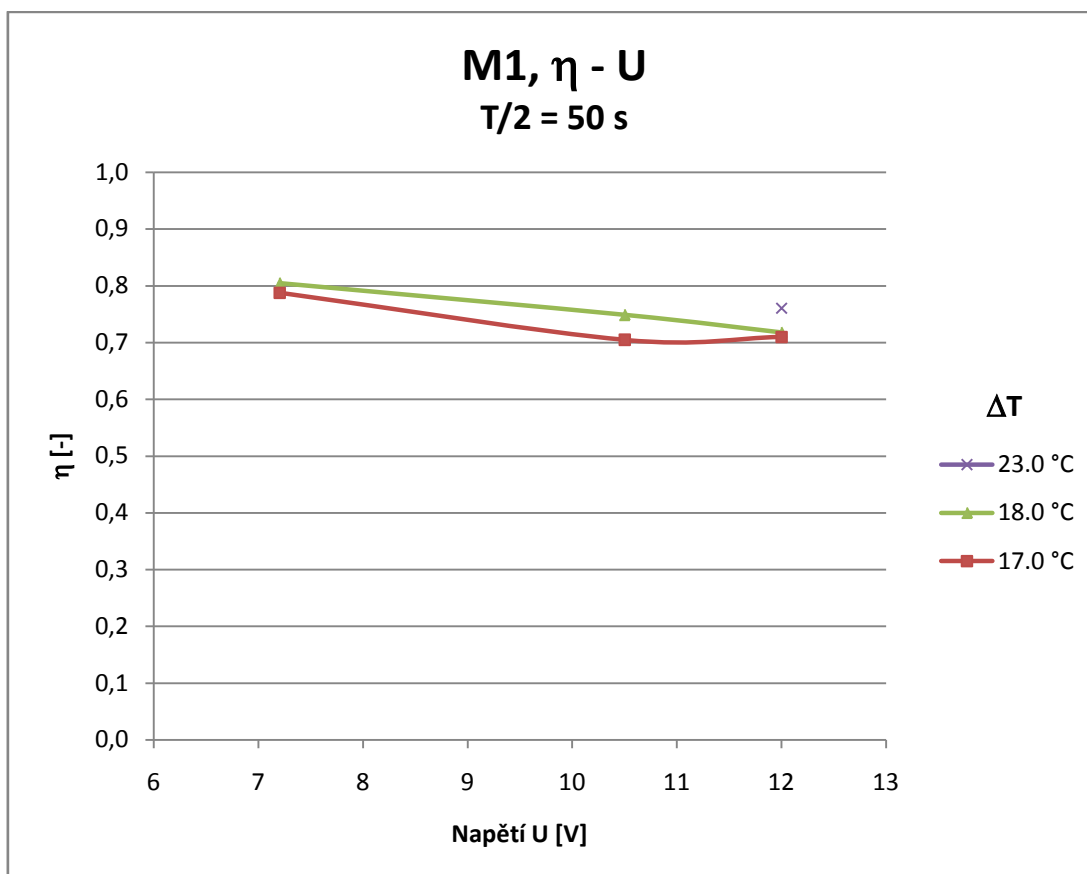
M1 CELKOVÁ účinnost výměníku η [%]							
délka půlperrody	T/2 [s]	80					
napětí na ventilátorech	rozdíl teplot (vnitřní - venkovní)						
U	delta T						
V	°C						
	14.0	17.0	18.0	21.0	23.0	24.2	34.8
12.0		0.65	0.66		0.69		
10.5		0.65	0.67				
7.2		0.70	0.72				



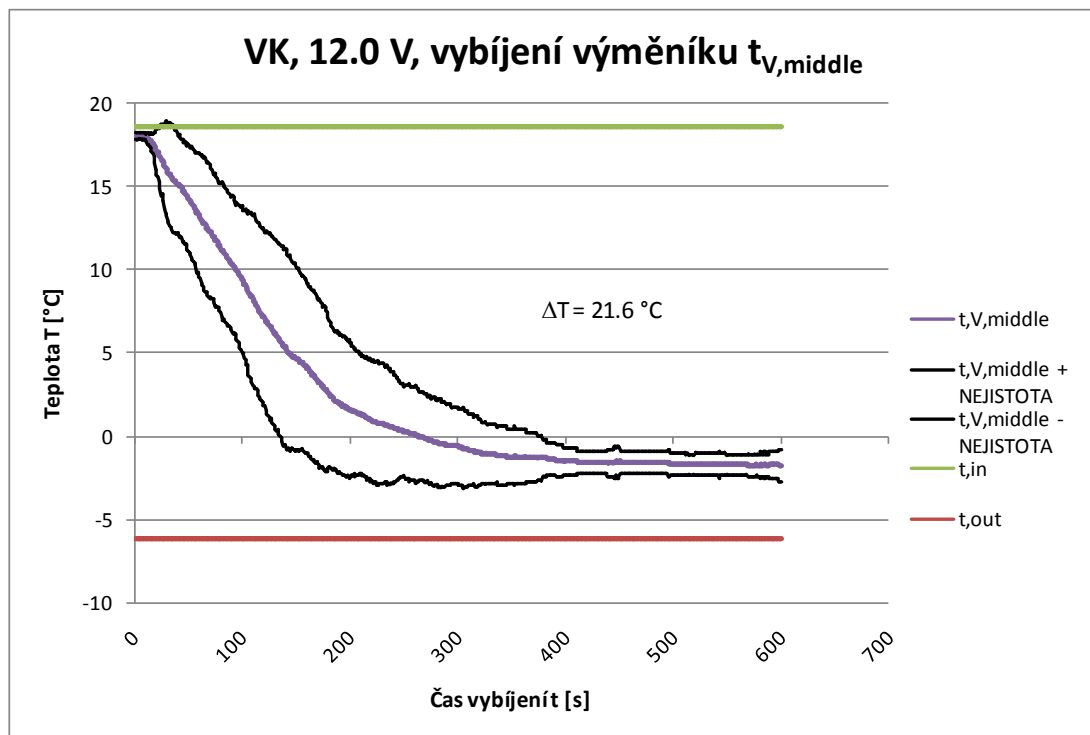
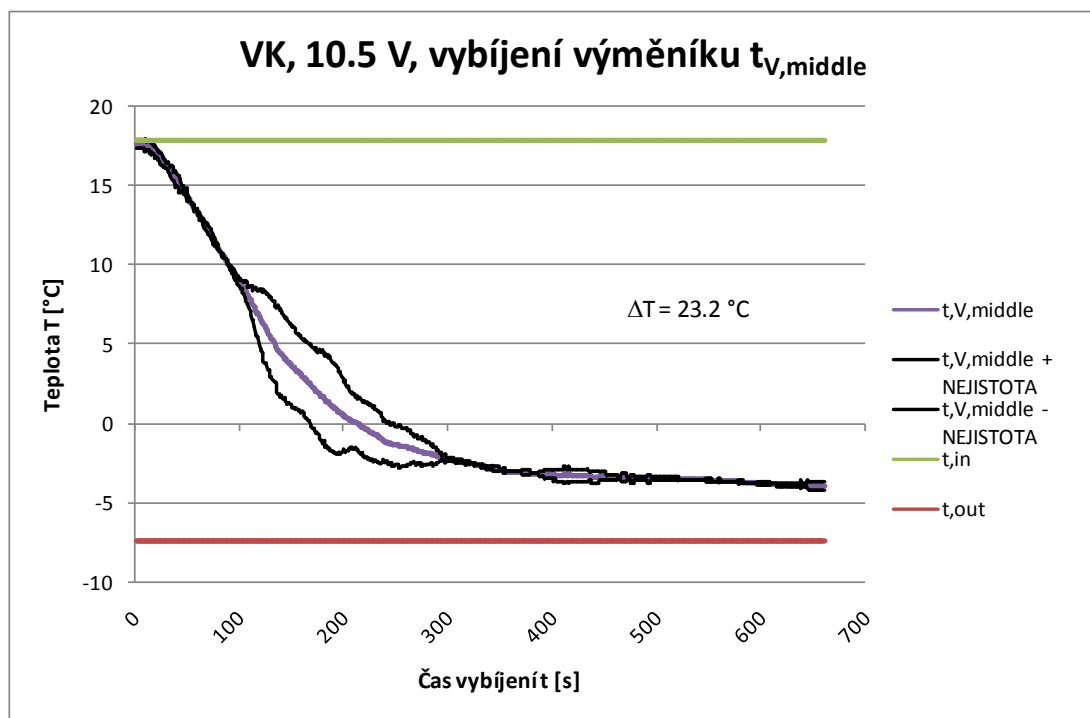
M1 CELKOVÁ účinnost výměníku η [%]							
délka půlperiody	T/2 [s]	70					
napětí na ventilátorech	rozdíl teplot (vnitřní - venkovní)						
U	delta T						
V	°C						
	14.0	17.0	18.0	21.0	23.0	24.2	34.8
12.0	0.67	0.67	0.67		0.73		
10.5		0.68	0.68				
7.2		0.74	0.76				



M1 CELKOVÁ účinnost výměníku η [%]							
délka půlperiody		T/2 [s]	60				
napětí na ventilátorech	rozdíl teplot (vnitřní - venkovní)						
U	delta T						
V	°C						
	14.0	17.0	18.0	21.0	23.0	24.2	34.8
12.0		0.70	0.69		0.74		
10.5		0.69	0.70				
7.2		0.75	0.77				



M1 CELKOVÁ účinnost výměníku η [%]							
délka půlperiody		T/2 [s]	50				
napětí na ventilátorech	rozdíl teplot (vnitřní - venkovní)						
U	delta T						
V	°C						
	14.0	17.0	18.0	21.0	23.0	24.2	34.8
12.0		0.71	0.72		0.76		
10.5		0.70	0.75				
7.2		0.79	0.80				

Příloha č. 4: Grafy validačních křivek pro CFD simulaci, teplota $t_{V,middle}$ $U = 12,0 \text{ V}$  $U = 10,5 \text{ V}$ 

$U = 7,2 \text{ V}$ 